



Universidad Politécnica de Cartagena

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

# **Simulación y evaluación de prestaciones de un protocolo ARQ cooperativo con múltiples relays**

**Julio J. Foulquié Vicente**

Director

**Juan José Alcaraz Espín**

2009



*A mis padres, que me lo han dado todo  
y sin los que probablemente hoy,  
no sería quien soy.*



**Autor:** *Julio J. Foulquié Vicente*

**Correo electrónico del Autor:** *jfoulquie@gmail.com*

**Director(es):** *Juan José Alcaraz Espín*

**Correo electrónico del Director:** *juan.alcaraz@upct.es*

**Codirector(es):**

**Título del PFC:** *Simulación y evaluación de prestaciones de un protocolo ARQ cooperativo con múltiples relays*

**Title:** *Simulation and performance evaluation of a multi-relay cooperative ARQ protocol*

**Etiquetas:** *Relaying, Multi-hop, cooperative relaying, data link layer*

**Titulación:** *Ingeniería de Telecomunicación*

**Departamento:** *Tecnología de la Información y las Comunicaciones (TIC)*

**Fecha de Presentación:** *Septiembre - 2009*



# Abstract

The evolution of radio access networks towards 4G technologies implies a big increase on bandwidth. At very high binary rates, the error rates are increasingly bigger, so a higher power signal is required all over the coverage area. A feasible strategy consists on using relays with some kind of C-ARQ protocol.

The idea is really simple. In a wireless channel the frames can arrive with errors to the receiver. Nowadays, the solution consists on forwarding the frames when it is detected that they have been lost (ARQ). When a relay receives a lost frame, it can help the base station by forwarding a copy of that frame simultaneously with the base station (C-ARQ). In that scenario with multiple relays, more than one relay node can forward simultaneously the information towards the same receiver.

The goal of this project is to develop the multiple relay C-ARQ protocol, starting from a C-ARQ simulator for a single relay and then, make a performance evaluation for different configurations.





# Resumen

La evolución de las redes de acceso radio hacia tecnologías 4G implica un aumento considerable en los anchos de banda. A velocidades binarias muy altas las tasas de errores en la transmisión son cada vez mayores, por lo que hace falta una mayor potencia de señal en todo el área de cobertura. Una estrategia factible es el uso de pequeños repetidores denominados relays que implementen algún tipo de protocolo ARQ cooperativo (C-ARQ). La idea de funcionamiento es muy sencilla. En un canal inalámbrico las tramas pueden llegar dañadas al receptor. Actualmente la solución consiste retransmitir las tramas cuando se detecta que se han perdido (ARQ). Si un relay ha recibido la trama perdida, puede ayudar al transmisor retransmitiendo una copia de la trama perdida al mismo tiempo que lo hace el transmisor (C-ARQ). En C-ARQ con múltiples relays, más de un nodo relay puede retransmitir simultáneamente la información hacia un mismo receptor. El objetivo del proyecto es implementar la funcionalidad C-ARQ con múltiples relays, partiendo de un simulador C-ARQ para un solo relay y, posteriormente, evaluar su rendimiento en distintas configuraciones.



# Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido de alguna manera a la realización de este proyecto.

Para comenzar me gustaría agradecer a Juanjo la oportunidad de realizar este proyecto tan interesante. Además, ha estado ahí siempre que lo he necesitado a lo largo de toda la realización del proyecto prestando siempre una valiosa ayuda. Sin su comprensión, apoyo y dedicación este proyecto nunca se hubiera terminado.

Finalmente agradecer a toda mi familia el simple hecho de estar ahí ya que, sin saberlo, han supuesto un gran apoyo para mí. Por supuesto mis padres han jugado un papel esencial y destacable en todo este proceso. ¡Gracias!



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción a los relays cooperativos . . . . .	1
1.2. Introducción a los protocolos C-ARQ . . . . .	2
1.3. Aplicaciones comerciales . . . . .	3
1.4. Objetivos del proyecto . . . . .	4
1.5. Estructura del proyecto . . . . .	5
<b>2. Protocolos C-ARQ</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	7
2.2. Protocolos ARQ . . . . .	7
2.2.1. Parada y espera . . . . .	8
2.2.2. Go-Back-N . . . . .	8
2.2.3. Retransmisión selectiva . . . . .	9
2.3. Protocolos C-ARQ . . . . .	9
2.4. Estudios previos . . . . .	10
2.5. C-ARQ en este proyecto . . . . .	11
<b>3. Simulador del protocolo C-ARQ</b>	<b>13</b>
3.1. Introducción . . . . .	13
3.1.1. OMNeT++ . . . . .	13
3.2. Implementación del simulador . . . . .	14
3.2.1. Simulador original . . . . .	14
3.2.2. Estación Base . . . . .	15
3.2.3. Relays . . . . .	16
3.2.4. Destinos . . . . .	17
3.2.5. Modelo del canal . . . . .	17
3.2.5.1. Capa física . . . . .	17
3.2.5.2. Movilidad . . . . .	18
3.2.5.3. Estado del canal . . . . .	19
3.2.5.4. Controlador del canal . . . . .	19
3.3. Validación del simulador . . . . .	21
3.3.1. Comportamiento del canal . . . . .	23

3.3.2.	Relay-enhanced cell . . . . .	24
3.3.2.1.	Descripción . . . . .	24
3.3.2.2.	Resultados teóricos . . . . .	25
3.3.2.3.	Resultados de simulación . . . . .	26
3.3.2.4.	Conclusiones . . . . .	26
3.3.3.	Usuarios cooperativos . . . . .	27
3.3.3.1.	Descripción . . . . .	27
3.3.3.2.	Resultados teóricos . . . . .	27
3.3.3.3.	Resultados de simulación . . . . .	28
3.3.3.4.	Conclusiones . . . . .	28
<b>4.</b>	<b>Simulaciones y resultados numéricos</b>	<b>31</b>
4.1.	Nodos relay fronterizos . . . . .	31
4.1.1.	Definición teórica . . . . .	31
4.1.2.	Resultados numéricos . . . . .	31
4.1.3.	Conclusiones . . . . .	32
4.2.	Nodos relay fronterizos con múltiples destinos . . . . .	34
4.2.1.	Definición teórica . . . . .	34
4.2.2.	Resultados numéricos . . . . .	34
4.2.3.	Conclusiones . . . . .	36
4.3.	Camino multi-salto . . . . .	37
4.3.1.	Definición teórica . . . . .	37
4.3.2.	Resultados numéricos . . . . .	37
4.3.3.	Conclusiones . . . . .	38
4.4.	Doble frontera con múltiples usuarios . . . . .	39
4.4.1.	Definición teórica . . . . .	39
4.4.1.1.	Reenvío obligatorio . . . . .	39
4.4.1.2.	Reenvío probabilístico . . . . .	39
4.4.2.	Resultados numéricos . . . . .	40
4.4.2.1.	Reenvío obligatorio . . . . .	40
4.4.2.2.	Reenvío probabilístico . . . . .	40
4.4.3.	Conclusiones . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>Conclusiones generales y líneas futuras</b>	<b>43</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo A</b>	<b>45</b>
	<b>Acrónimos y abreviaturas</b>	<b>55</b>

# Índice de figuras

1.1. Representación del uso de relays en una red con una BS y un Destino . . .	2
1.2. Esquema de funcionamiento de una red WiMAX . . . . .	4
2.1. Concepto de cooperación en una red con un relay y un destino . . . . .	10
3.1. Ejemplo genérico de una red en el simulador, 3 relays y 1 destino. . . . .	16
3.2. Sistema de coordenadas del módulo de movilidad . . . . .	18
3.3. Ejemplo genérico de la matriz utilizada por el módulo ChannelController	20
3.4. Ganancia de un canal con slow fading tipo Rayleigh . . . . .	22
3.5. Evolución del PER en función de la distancia para un enlace directo . . .	23
3.6. Evolución del PER en función de la longitud de las tramas (en b) . . . . .	24
3.7. Evolución del PER en función de la potencia de transmisión de la BS . . .	24
3.8. Medidas de rendimiento teóricas vs N para $p_R = 1$ . . . . .	26
3.9. Rendimiento respecto N con $p_S = 1$ . . . . .	26
3.10. Rendimiento respecto N con $p_S = p_S^*$ . . . . .	27
3.11. Medidas de rendimiento vs N para $p_R = 0,2$ . . . . .	28
3.12. Rendimiento vs N para $p_S = 1$ . . . . .	28
3.13. Rendimiento vs N para $p_S = p_S^*$ . . . . .	29
4.1. Esquemático del escenario “Nodos relay fronterizos” . . . . .	31
4.2. PER y retardo frente al número de relays con $p_S = 1$ . . . . .	32
4.3. Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N con $p_S = 1$ . . .	32
4.4. Throughput vs Distancia . . . . .	34
4.5. Tasa relativa de throughput frente a $p_S$ . . . . .	35
4.6. Throughput relativo obtenido para diversas configuraciones . . . . .	35
4.7. Esquemático del escenario “Camino multi-salto” . . . . .	37
4.8. PER y retardo frente al número de relays con $p_S = 1$ . . . . .	37
4.9. Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N con $p_S = 1$ . . .	38
4.10. Esquemático del escenario “Doble frontera con múltiples usuarios” . . . .	39
4.11. Retardo frente al número de relays . . . . .	40
4.12. Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N . . . . .	40
4.13. Retardo frente al número de relays . . . . .	41
4.14. Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N . . . . .	41

A.1. Schematic diagram of the system analyzed . . . . .	46
A.2. Discrete Time Markov Chain modeling the operation of the system . . . .	47
A.3. Performance vs. N in a relay enhanced cell scenario. . . . .	52
A.4. $p_S^*$ vs. N in a relay enhanced cell scenario. . . . .	52
A.5. Performance vs. N when the relays are cooperative users. . . . .	53
A.6. $p_S^*$ vs. N when the relays are cooperative users. . . . .	53



# Introducción

Los protocolos ARQ han sido utilizados para el control de errores y de flujo en multitud de sistemas de telecomunicación como redes celulares, LAN inalámbricas, enlaces de radio frecuencia (RF) y otros canales diversos [23]. El uso de este tipo de protocolos en las redes celulares se aborda en este proyecto aunque las conclusiones obtenidas pueden ser aplicables a cualquier ámbito donde el uso de este tipo de protocolos pueda resultar útil.

El aumento imparable de las comunicaciones móviles es un hecho hoy en día. En los últimos años hemos asistido, tanto usuarios como operadoras, a un avance gigantesco en lo que a velocidades, cobertura, servicios... se refiere. Obviamente, el aumento de la demanda hace necesario renovar la tecnología para poder satisfacer las altas tasas requeridas por los nuevos sistemas de comunicación. En la actualidad hemos contemplado la implantación progresiva de la tercera generación de telefonía móvil (conocida como 3G) y, a su vez, estamos presenciando el desarrollo de la nueva generación (4G). Hasta ahora, los protocolos ARQ tradicionales eran suficientes para alcanzar una alta fiabilidad en el transporte de la información, operando bajo las condiciones de una red celular clásica. Con la llegada de esta nueva generación, se presentan dos problemas fundamentales a resolver en relación a la cobertura. Por un lado, la energía disminuye linealmente con el incremento de la tasa binaria y la nueva generación prevé utilizar altas tasas binarias. Por otro lado se presentan problemas debido a la banda de frecuencia a utilizar (2 GHz por encima de la usada en 3G) ya que ofrece una mayor vulnerabilidad a condiciones NLOS. Los protocolos ARQ clásicos presentan un buen funcionamiento siempre que las tasas de error de los enlaces no sean demasiado altas, puesto que si se tienen que producir demasiadas retransmisiones, el retardo en la recepción de los paquetes hace inviable la comunicación.

## 1.1. Introducción a los relays cooperativos

Para poder resolver estos nuevos problemas sin caer en la clásica solución de añadir nuevas y más potentes antenas (con los conflictos, tanto económicos como sociales, asociados a su instalación), una de las soluciones propuestas pasa por el uso de nodos intermedios (conocidos como nodos relay o *Relay Nodes* (RN)) que doten a la red de

una mayor capacidad y fiabilidad. Estos nodos necesitarían menos potencia de funcionamiento, y por consiguiente, presentarían menores costes y problemas de instalación. Otra posible solución, similar en concepto aunque totalmente diferente en ejecución sería desarrollar terminales de usuario que actúen a la misma vez como terminales y como *Relay Nodes*, con lo que, a costa de un pequeño gasto energético del lado de los usuarios, la capacidad y fiabilidad de la red se vería incrementada. Conceptualmente sería algo similar al funcionamiento de la red de VoIP de Skype donde se utiliza tecnología *Peer to Peer* (P2P) para mejorar la calidad de servicio disminuyendo de ese modo la carga necesaria para el funcionamiento de la red en los servidores centrales [22].

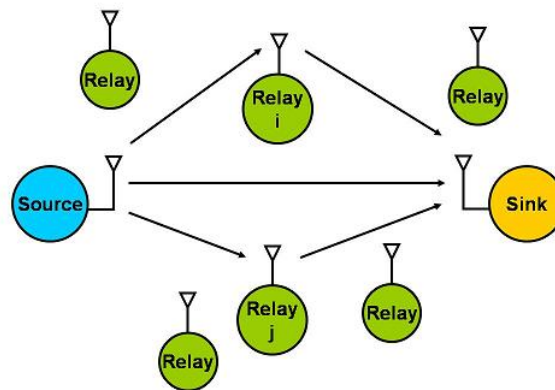


Figura 1.1: Representación del uso de relays en una red con una BS y un Destino

Se introduce por tanto un nuevo rol en la red, ya sea desde un aparato independiente que forme parte de la infraestructura de la red o desde los mismos terminales de los usuarios. Este nuevo elemento es capaz de cooperar activamente con la red, ayudando con la regeneración y retransmisión de los mensajes que le lleguen. Los protocolos ARQ tradicionales no están pensados para aprovechar las posibilidades que estos nuevos nodos ofrecen, por lo que surge la necesidad de buscar nuevas variantes y/o alternativas. Bajo este pretexto nacen los protocolos C-ARQ.

## 1.2. Introducción a los protocolos C-ARQ

Los protocolos ARQ cooperativos (C-ARQ) permiten que nodos que no sean ni la estación base ni los destinos participen activamente en el funcionamiento de la red, ayudando a la correcta entrega de tramas de datos a los destinos. El concepto esencial es que un nodo intermedio entre la estación base y el destino, pueda cooperar (en caso de que sea necesario o permanentemente, depende de la variante) utilizando la señal broadcast recibida, mejorando con ello la capacidad total de la red. Resumiendo, cuando una trama de datos procedente de la estación base no haya llegado a su destino correctamente, un nodo cercano (llamado relay) puede haberla recibido correctamente, por lo que podrá reenviarla al destino que no la recibió correctamente y así la estación base no tendrá que volver a retransmitir dicha trama. La cooperación de los nodos relay incrementa la capacidad total de la red aumentando la eficiencia y disminuyendo el número de retransmisiones de la

estación base y los retardos asociados a éstas. De este modo los nodos destino pueden recibir los datos desde la estación base o desde cualquier relay (incluso pueden ser otros destinos los que actúen como relays). En general, este relay estará más próximo al destino que la estación base, por lo que puede retransmitir los mismos paquetes que reciba con menores pérdidas.

Existe una gran cantidad de estudios relacionados con el uso, configuración y rendimiento de protocolos C-ARQ y muchos de ellos son comentados en 2.4. Existen diversos tipos de cooperación (tal y como se detalla en 2.3) y todos ellos mejoran en mayor o menor medida los marcadores de rendimiento de un sistema. Si se lee [35] se puede comprobar como un sencillo sistema de cooperación basado en un protocolo de parada y espera con dos nodos relay, puede incrementar del orden de un 30 % el rendimiento total de la red en unas condiciones de  $PER = 0.5$ . El retardo puede ser reducido en un 60 % y el jitter hasta en un 85 %. Estos son algunos de los valores conseguidos para una red wireless operando en modo ad-hoc. En el artículo [15] se evalúan tres tipos distintos de protocolos C-ARQ, los resultados obtenidos indican como es posible disminuir la tasa de error de paquete (PER) mediante el uso de un único nodo relay, y la mejora respecto al ARQ tradicional es notable. Por otra parte, tal y como se describe en el [6] (que se adjunta como anexo al final del documento), el hecho de poder delegar la función de retransmisión en los nodos relay hace que la estación base pueda aprovechar todo esos canales para introducir nuevas tramas en el sistema, aumentando con ello el throughput total del sistema.

En definitiva, el uso de nodos cooperativos en las futuras redes de comunicación promete abrir un nuevo mundo de posibilidades sobre el que merece la pena investigar. Los aumentos de throughput y la disminución del retardo (dependiendo de la configuración) así como del jitter, utilizando para ello protocolos que no encierran en sí una complejidad demasiado alta hacen que se presente un escenario prometedor para este tipo de investigaciones.

### 1.3. Aplicaciones comerciales

El uso de relays y de protocolos cooperativos es una apuesta de futuro por parte de diversos sistemas comerciales. Posiblemente los más importantes sean la tecnología WiMAX y las redes de telefonía 4G aunque también existe interés en tecnologías como IEEE 802.11s[26, 27].

El concepto de relay está muy presente en la tecnología WiMAX. En 2006, el IEEE aprobó un proyecto llamado *P802.16j* para la especificación de un *relay móvil multisalto* (MMR) que incrementaría la cobertura de la estación base sin necesidad de conectarse al *backhaul*. La estación base MMR proporciona el área de cobertura principal además de contar con una conexión directa al *backhaul*. El nodo relay aumenta la cobertura proporcionada por la estación base. Así, un usuario cualquiera puede conectarse a una estación base, a una estación base MMR o a un nodo relay [28].

En cuanto a las redes celulares 4G, también se prevé que funcionen con sistemas basados en relays. Tal y como dice el profesor danés Frank H. P. Fitzek en su libro acerca de redes cognitivas [29], la futuras implementaciones de la cuarta generación de telefonía celular, los terminales de usuario podrían dejar de operar de manera pasiva, y serían

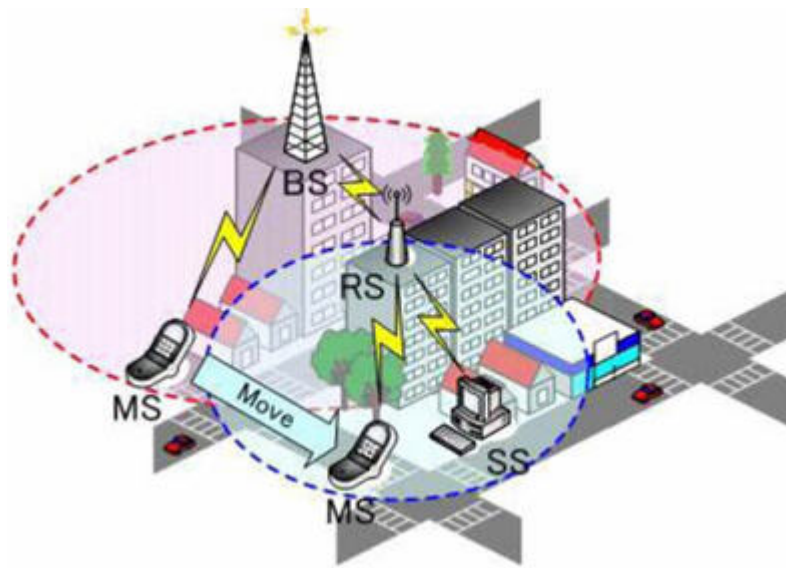


Figura 1.2: Esquema de funcionamiento de una red WiMAX

capaces formar redes de malla y operar como *routers* o como relays para otros nodos, estableciendo de este modo comunicaciones multisalto, minimizando (en incluso suprimiendo) con ello las relaciones con una estación base centralizada (en cada célula, se entiende). El profesor Rober W. Heath, de la Universidad de Texas también cree que la cuarta generación evolucionará hacia técnicas cooperativistas. Él cree que la clave para el desarrollo de este tipo de tecnologías está en el uso conjunto de tres tecnologías: el uso de relays y protocolos cooperativos, desarrollo e implementación de enlaces de comunicación *Multiple-Inputs Multiple-Outputs* (MIMO) y por último la utilización de multiplexaciones OFDM [30].

Como se puede ver el uso de relays y los conceptos de cooperación no son únicamente una quimera teórica. Su utilización en aplicaciones comerciales es inminente y por ello es más interesante si cabe la investigación alrededor de estos conceptos.

## 1.4. Objetivos del proyecto

El presente proyecto busca, partiendo del simulador creado en [5] para un protocolo C-ARQ y un único relay, desarrollar uno nuevo que presente la posibilidad de incorporar múltiples relays y múltiples destinos, así como que incorpore un modelo más realista para representar las pérdidas en el canal (principalmente las debidas a *fading*) e incluyendo el movimiento de los terminales (al menos de los usuarios). El programa implementará una versión de C-ARQ como la utilizada en [6] intentando, en un primer momento, replicar los resultados obtenidos en el artículo (ver A). Una vez desarrollado y tras su validación correspondiente, se pretenden simular diversos escenarios para ayudar a entender mejor el funcionamiento de este tipo de protocolos; de este modo se pretenden descubrir comportamientos que a priori, pueden no ser demasiado intuitivos. Algunas cuestiones a responder podrían ser ¿aumenta el throughput de la red con el número de relays? ¿de qué manera? ¿disminuye la probabilidad de error de los enlaces entre estación base y destino

añadiendo relays? ¿de qué manera? ¿influye la posición de dichos relays? Los cálculos matemáticos asociados a este tipo de cuestiones pueden ser muy complejos si se quieren desarrollar para cierto número de nodos por lo que, el objetivo principal de este proyecto es profundizar un poco más en la comprensión de este tipo de redes, su comportamiento y su rendimiento. Como se verá más adelante algunas de las cuestiones planteadas tienen una respuesta intuitiva mientras que otras serán sorprendentes por su ruptura con la visión tradicional que se tiene de las redes de comunicaciones.

## 1.5. Estructura del proyecto

El presente proyecto está compuesto, en primer lugar por un capítulo de introducción en el que, a su vez, se van contextualizando y definiendo los objetivos del proyecto. A continuación se exponen los orígenes de los protocolos C-ARQ y se proporciona una explicación detallada acerca de los mismos, incluyendo definición, tipos y comentarios acerca de algunos estudios previos relacionados con los protocolos C-ARQ y, por supuesto, la definición concreta del tipo de protocolo C-ARQ utilizado en este proyecto. Tras la explicación detallada del protocolo de manera teórica se pasa a comentar la implementación realizada del mismo, comentando cada módulo del simulador por separado pero siempre teniendo en cuenta que forman parte de un todo. Para terminar tenemos los resultados numéricos obtenidos para las distintas simulaciones realizadas así como, más adelante, las conclusiones obtenidas con dichos resultados y las posibles líneas futuras que el presente proyecto deja abiertas.



## Protocolos C-ARQ

### 2.1. Introducción

Los protocolos ARQ son protocolos o algoritmos genéricos utilizados para el control de errores en la transmisión de datos. Estos protocolos se utilizan tradicionalmente (además de en muchas más aplicaciones) en redes celulares. Anteriormente un protocolo ARQ clásico podía garantizar una alta fiabilidad en el transporte de la información. Sin embargo, los próximos avances en redes celulares necesitan garantizar un PER, y con los protocolos existentes no se puede cumplir los requerimientos de las nuevas redes. Por ello se hace necesario el desarrollo de nuevos modelos o técnicas que satisfagan las nuevas necesidades. Es por ello que surgen los protocolos cooperativos.

### 2.2. Protocolos ARQ

Los mecanismos ARQ son algoritmos genéricos de control de flujo y control de errores punto a punto[2, 3]. Aunque habitualmente se describen en la capa de enlace, se emplean también en capas superiores, con las modificaciones pertinentes. Por ejemplo, las diferentes versiones de TCP emplean variantes de estos algoritmos para el control de errores extremo a extremo y el control de la congestión de red.

Estos algoritmos basan su funcionamiento en el uso de detección de errores, temporizadores, paquetes de reconocimiento positivo (ACK) y negativo (NACK) y retransmisiones de los diferentes tipos de paquetes.

De manera general el funcionamiento de estos algoritmos es el siguiente: el transmisor encapsula los datos en tramas de nivel de enlace (DATA) y los envía al receptor. Cada trama se numera consecutivamente, mediante un número de secuencia (SN), de manera que se pueda garantizar la entrega ordenada al nivel superior. La trama de enlace incluye un campo de verificación de trama (CRC) de manera que el receptor puede comprobar si la trama ha sido dañada en el tránsito. En este caso la trama se descarta. En caso contrario, se envía al transmisor una trama de reconocimiento, que incluye el número de secuencia de la trama recibida correctamente. El transmisor debe retransmitir las tramas que no han sido recibidas correctamente. Para evitar que el protocolo quede bloqueado, es necesario

utilizar temporizadores para la retransmisión de las tramas. Los distintos algoritmos ARQ definen la forma en particular en la que se deben emplear los distintos tipos de tramas y los temporizadores para implementar el comportamiento deseado. El control de flujo se realiza mediante la técnica de ventana deslizante. En esencia, esta técnica consiste en limitar el número máximo de tramas en tránsito. Es decir, el número de tramas que han sido enviadas pero no han sido reconocidas. A este número se le denomina tamaño máximo de ventana. El transmisor mantiene un buffer con todas las tramas enviadas pendientes de reconocimiento. A este buffer se le denomina ventana de transmisión. Los mecanismos ARQ más comunes son “Parada y Espera” (*Stop and Wait*), “Retroceso-N” (*Go-Back-N*) y “Retransmisión Selectiva” (*Selective Repeat*, también conocido como “Rechazo Selectivo”). Estos algoritmos difieren en la forma de gestionar los errores y todos ellos tienen distintas variantes. En las siguientes secciones se detallará brevemente su funcionamiento. Los protocolos vistos hasta ahora son del tipo “no-cooperativo”. Existen en la actualidad una nueva familia de protocolos ARQ que son los llamados “cooperativos”; estos protocolos responden a un nuevo tipo de necesidades (por ejemplo en redes multisalto) donde los antiguos mecanismos de retransmisión no son lo suficientemente eficientes para los requisitos actuales. Este tipo de protocolo es sobre el que se desarrolla este proyecto y serán explicados en profundidad en secciones posteriores.

### 2.2.1. Parada y espera

El protocolo de “Parada y espera” (*Stop and wait*) consiste en que el transmisor, una vez que envía un paquete no enviará el siguiente hasta que no reciba el correspondiente ACK; en caso de recibir un NACK el transmisor reenviará el paquete anterior. Como se puede observar no es demasiado eficiente por lo que no es válido en entornos con muchos errores.

### 2.2.2. Go-Back-N

En este protocolo (también conocido como “Rechazo simple”) utiliza el concepto de ventana deslizante. En este protocolo el transmisor continúa enviando tramas (aún cuando no haya llegado un ACK que las reconozca) hasta que alcanza el límite de la ventana. El receptor por su parte solamente aceptará tramas que le lleguen en el orden esperado, por lo que no necesita disponer de ningún buffer de almacenamiento. Si se produce un error en la recepción el transmisor recibirá un NACK y deberá reenviar todas las tramas que hayan en la ventana (es decir, todas las tramas enviadas sin confirmar). Como se puede observar el funcionamiento es relativamente sencillo y eficiente, sin embargo, por cada error, se produce la retransmisión de  $N$  tramas. Nótese que, en general,  $N$  es distinto del tamaño de la ventana, y depende del RTT. El número de retransmisiones  $N$  corresponde al número de tramas que se pueden enviar durante un RTT, que es el tiempo mínimo necesario para detectar un error.  $N$  siempre será menor o igual que el tamaño máximo de la ventana.



### 2.2.3. Retransmisión selectiva

El mecanismo Go-Back-N destaca por su sencillez y porque no es necesario que el receptor disponga de un buffer de almacenamiento de tramas. Sin embargo, cuando se produce un error, es ineficiente, puesto que la pérdida de una única trama da lugar a múltiples retransmisiones (N). El mecanismo de retransmisión selectiva corrige esta ineficiencia a costa de complicar la implementación del transmisor y receptor.

En este caso, el receptor acepta todas las tramas, independientemente de si llegan en secuencia o no, pero sólo las entrega de manera ordenada al nivel superior. Por su parte, el transmisor sólo retransmite las tramas que no han sido reconocidas correctamente. Por tanto, es necesario un buffer de almacenamiento tanto en transmisor como receptor, es decir, existe una ventana de recepción y ventana de transmisión. Ambas ventanas tendrán un tamaño máximo W. El receptor almacenará las tramas recibidas en su ventana de recepción y las irá entregando si llegan secuencialmente. En caso de producirse un error, el receptor sigue aceptando las siguientes tramas, pero sólo las entrega cuando dispone de una secuencia completa, es decir, cuando ha recibido de nuevo y correctamente la trama errónea (entrega ordenada). Al igual que en los dos anteriores, existen diferentes versiones e implementaciones de este concepto cada una con su particularidad.

## 2.3. Protocolos C-ARQ

El concepto general de los protocolos C-ARQ está definido en 1.2 aunque, a modo de resumen, se podría decir que son protocolos que tienen en cuenta la participación activa en el funcionamiento de la red de un nodo que no es ni la estación ni los usuarios (pueden ser los usuarios pero actuando como *Relay Nodes*). Estos nodos actúan en caso de que una trama no se reciba correctamente, ayudando de distinta forma en el funcionamiento de la red (ya sea reenviando, regenerando o recodificando los mensajes que reciben) y contribuyendo así en el buen funcionamiento de la red. En general pueden darse tres tipos de cooperación[32, 7]:

- **Amplificación y reenvío:** esta es la forma más simple de cooperación. El nodo relay simplemente amplifica la información recibida desde la estación base y la reenvía a los destinos. En el destino, la información enviada por la estación base es combinada con la señal reenviada por el relay para determinar si la trama llegó con error (y tratar de corregirlo). La gran ventaja de este método es que el destino recibe la información a través desde dos caminos independientes lo que puede proporcionar mejores condiciones de comunicación [8]. El inconveniente, sin embargo, es que si existen errores en la transmisión desde la estación base hasta el relay, dicho error se propagará también hasta el destino [7].
- **Detección y reenvío:** en este método, el relay recibe la trama y la analiza, en caso de que ésta se encuentre libre de errores la reenvía. Al igual que en el caso anterior, cuando retransmite una trama es siempre una copia exacta de la trama de datos recibida (el relay no realiza ninguna modificación) aunque sí decodifica la trama para comprobar si se ha recibido o no con errores.

- **Cooperación codificada:** también conocida como *Coded Cooperation*, en este método la cooperación es bastante más avanzada. Ahora el relay no se limita a reenviar las tramas si no que además puede aplicar sobre ellas diversos algoritmos de control de errores con lo que se pueden lograr importantes mejoras en el control y corrección de errores del lado del destino. Un ejemplo de esto lo encontramos en [11, 12] donde el destino recibe dos tramas iguales junto a dos códigos de control de errores diferentes, lo que otorga a las tramas una doble protección contra los errores y una mayor posibilidad de recuperación.

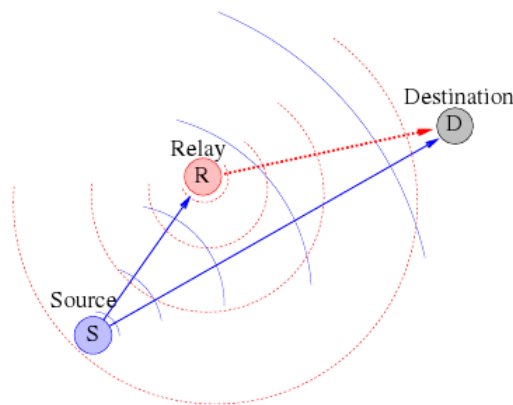


Figura 2.1: Concepto de cooperación en una red con un relay y un destino

Dentro de estos tres tipos de cooperación existen una gran variedad de protocolos y versiones de los mismos que desarrollan y puntualizan diversos conceptos relacionados con las políticas de reenvío, planificación de paquetes en la estación base y otros aspectos. En la siguiente sección se repasará un poco la bibliografía existente (o parte de ella al menos) acerca de la cooperación de nodos en protocolos ARQ.

## 2.4. Estudios previos

El protocolo ARQ está ampliamente adoptado en los actuales sistemas inalámbricos de comunicaciones tales como la tecnología 3G, sistemas MAN inalámbricos [4], etc. El uso de técnicas ARQ en este tipo de sistemas es una manera muy eficiente de mejorar la capacidad total del sistema así como de combatir los efectos del desvanecimiento de canal (*fading channel*). La siguiente generación de telefonía móvil (4G) exige unos rendimientos que los protocolos ARQ tradicionales no pueden satisfacer, por ello existe una creciente apuesta por el uso de protocolos C-ARQ para la tecnología 4G [33]. Por este motivo existen una gran cantidad de estudios y de propuestas relativas a métodos de comunicación cooperativos.

Uno de los estudios más tempranos fue [9], donde el nodo relay decodifica y retransmite los bits de información recibidos desde la estación base en el siguiente slot temporal. En [10] se pueden encontrar diversas propuestas que modifican el modo de actuación de los relays para implementar una técnica derivada de la retransmisión selectiva (ver 2.2.3).

Por otro lado, un buen ejemplo de cooperación codificada se puede encontrar en [11, 12]. Aquí el nodo relay procesa la trama y la vuelve a enviar reescribiendo sus bits de paridad. El receptor consigue mediante el uso de dos códigos distintos de paridad un mensaje mucho más robusto frente a los errores. Existen otros trabajos [13] que introducen un método de cooperación con códigos espacio-temporales (*space-time code cooperation*), donde tanto el relay como la estación base transmiten simultáneamente la misma información utilizando una codificación espacio-temporal. Incluso existen estudios similares pero utilizando protocolos distribuidos explotando múltiples relays en redes inalámbricas en trabajos como [14].

En otros casos las propuestas son la unión de diversos conceptos, como los protocolos cooperativos propuestos en [15] en los que se combina la “retransmisión incremental” (*incremental relaying*) y la “retransmisión selectiva” [10]. En este caso se proponen tres variantes en las que los nodos relay solo retransmiten si las tramas son recibidas correctamente y el nodo destino informa de que las ha recibido con error. Los tres protocolos se comportan de manera similar aunque varían en la manera de actuar en el período de retransmisión; en la primera variante el nodo relay se limita a retransmitir, en la segunda solo retransmite si su ganancia de canal es mayor que la del canal de la estación base, la última variante hace que tanto la estación base como el relay retransmitan pero haciendo uso de códigos espacio-temporales.

Hay también un trabajo de la *University of Texas at Dallas* [16] que propone dos tipos de protocolos C-ARQ como una variante de los ya conocidos protocolos ARQ, Parada y Espera y Retransmisión Selectiva (ver 2.2.1 y 2.2.3) para redes con multiplexación en el tiempo. El primero de ellos es similar a sus homónimos en ARQ no cooperativo; la novedad estriba en que el nodo relay retransmite una réplica exacta de la trama de datos transmitida por la estación base, siempre que el destino indique que no la ha recibido correctamente. El segundo tipo propuesto es exactamente igual solo que además de reenviar la trama de datos, añade a ésta algunos bits de redundancia incremental, con lo que se consigue una mayor protección para los datos. Cabe destacar que en las variantes de Retransmisión Selectiva la estación base solo podrá transmitir una segunda trama sin que la primera haya sido confirmada. En tal caso, el relay solo necesita almacenar la primera trama sin confirmar hasta que el nodo destino confirme ésta o la siguiente (el nodo destino podría recibir dos tramas consecutivas en el mismo slot temporal y solo tendría que confirmar la segunda, para ello la estación base y el relay deberían transmitir por canales diferentes sin colisión).

En definitiva, al tratarse de una tecnología en desarrollo existen una amplia gama de propuestas y variantes en cuanto a protocolos C-ARQ se refiere. El presente proyecto está basado en una serie de artículos [5, 6] que serán descritos en la siguiente sección. En la misma se relatará en profundidad el protocolo C-ARQ utilizado en el proyecto aquí presentado.

## 2.5. C-ARQ en este proyecto

En este proyecto se han utilizado como base los trabajos [5, 6] (ver Anexo A) en los que se propone una nueva forma de actuar. Según dichos artículos, en una celda con re-

lays y múltiples usuarios, la capacidad total de la celda se puede ver incrementada si la estación base delega la retransmisión de algunas tramas en los relays. La clave está en que la estación base aprovecha los canales que deberían ser destinados a retransmisión para enviar tramas nuevas al resto de usuarios, de este modo la capacidad total de la red se ve incrementada puesto que nuevas tramas son enviadas en el tiempo en que se estaría retransmitiendo. Esta innovadora técnica, contraria a la tradicional política de otorgar máxima prioridad a las retransmisiones en los puntos de acceso inalámbricos, proporciona un aumento de la capacidad total de la red, que es mayor cuanto mayor es el número de usuarios. Siguiendo esta política, el protocolo funciona con el uso de ACK y temporizadores, la probabilidad de retransmisión tanto de la estación base como de los relays está predeterminada. La estación base realiza en cada slot temporal una ronda de envíos siguiendo una política concreta (ver 3.2.2) y, según el valor de probabilidad de retransmisión, enviando o no nuevas tramas a los destinos. La estación base no cuenta con ningún tipo de temporizador puesto que en cada slot temporal siempre tiene tramas para mandar (ya sean nuevas o reenviadas). Este comportamiento sigue las premisas estudiadas en [5, 6] y es el que, en teoría, permitirá aumentar la capacidad total del enlace descendente. Los relays almacenan las tramas más nuevas que les van llegando. Estos nodos son capaces de almacenar una trama por cada destino existente en la red por lo que si una trama más nueva llega, el relay elimina la anterior; de este modo se evita que almacenen información obsoleta. Ocurre de manera similar con los ACK, pueden almacenar uno procedente de cada destino pero siempre será el último. En cada slot temporal los relays reenvían, probabilísticamente, las tramas almacenadas a través de los canales que tengan disponibles, esta información se envía tanto en dirección a los destinos (tramas de datos) como en dirección a la estación base (ACK). El resto de relays son capaces de recibir la información enviada por otros relays (si las pérdidas del canal lo permiten) y actualizar la suya si la recibida es posterior. Por otro lado tenemos a los nodos destino que se limitan a enviar un ACK por cada trama recibida. En caso de que la trama sea correcta se envía un ACK con un SN igual al de la trama de datos recibida, en el caso de que el número de secuencia no corresponda con el esperado, el destino enviará un ACK con el SN de la última trama recibida correctamente. Mientras no llegue ninguna trama el nodo destino no enviará ningún ACK.

Como se puede observar el comportamiento seguido por los nodos en este protocolo C-ARQ es similar a los estudios previos realizados en torno a este tipo de protocolos. Incluye algunas novedades como el comportamiento de la estación base así como el hecho de no utilizar reconocimientos negativos (NACK) ni reconocimientos por parte de los relays (Relay-ACK).

## Simulador del protocolo C-ARQ

### 3.1. Introducción

Para la realización de este proyecto se ha partido de un simulador existente realizado por el tutor de este proyecto para un artículo de investigación relacionado con los relays [5]. El simulador estaba programado en OMNeT++ y tenía una funcionalidad diferente a la que se pretendía en este proyecto. A continuación, tras una breve introducción a OMNeT++ se pasará a explicar la funcionalidad de todos los módulos así como los cambios realizados desde la versión original del protocolo.

#### 3.1.1. OMNeT++

OMNeT++ es una librería de simulación basada en componentes y desarrollada en C++ que permite realizar simulaciones modulares basadas en eventos discretos. Habitualmente se suele utilizar para modelar el tráfico de redes de telecomunicaciones, protocolos, validación de arquitecturas hardware, evaluación del rendimiento de sistemas software y, en general, cualquier sistema que se pueda simular mediante eventos discretos.

Esta herramienta está disponible tanto para sistemas operativos basados en UNIX como para Windows y se distribuye bajo la Licencia Pública Académica[1].

El sistema de simulación de OMNeT++ provee un núcleo de simulación que contiene las rutinas que controlan las simulaciones y las bibliotecas de simulación, e interfaces de usuario que son usadas para la construcción de modelos y ejecución de simulaciones. Un modelo en OMNeT++ consiste básicamente de la descripción de la topología del modelo en el lenguaje NED, la definición de mensajes y el código de los módulos simples. Los modelos en OMNeT++ tienen una estructura modular. Existen objetos básicos con una funcionalidad básica a partir de los cuales se componen módulos complejos formando una estructura jerárquica anidada. La construcción de un modelo de simulación con OMNeT++ se resume en los siguientes pasos:

- Descripción de la estructura (módulos y relaciones) del sistema mediante el lenguaje NED.
- Implementación de los módulos simples en C++.

- Generación del modelo. Se compilan los módulos y se enlazan con la biblioteca de simulación.
- Configuración de la simulación. Se especifican los parámetros adecuados para la ejecución de la simulación.

En el caso de este proyecto se partía de un simulador ya realizado, pero aún así los pasos anteriormente descritos fueron necesarios puesto que las modificaciones fueron en algunos casos abundantes y afectaban todos los ámbitos (descripción de estructura, implementación, configuración...).

## 3.2. Implementación del simulador

### 3.2.1. Simulador original

El simulador original desde el que se comenzó este proyecto tenía un comportamiento distinto al requerido puesto que fue creado con otros propósitos, a continuación se describirá a grandes rasgos el comportamiento del simulador de partida y más adelante el comportamiento actual, para de esta forma poder valorar correctamente el trabajo realizado en el presente proyecto.

La primera gran diferencia entre la implementación del simulador y los requerimientos del proyecto radica en que el simulador original estaba concebido para operar con un solo relay en la red, mientras que el nuevo simulador permite elegir el número de relays que integrarán la red. La implementación anterior permitía elegir el número de destinos en tiempo de ejecución, pero no el de relays.

Por otra parte, la estación base tenía un comportamiento ligeramente diferente puesto que basaba su prioridad de envío, en el hecho de que el relay tuviera o no almacenada esa trama determinada. Para poder saber si el relay había recibido o no una determinada trama había un sistema por el cual éste enviaba una trama determinada ("RELAY\_ACK") a la estación base. Ese comportamiento ha sido descartado puesto que ahora la estación base actúa de manera diferente (el comportamiento de la estación base está detallado en su sección correspondiente, ver 3.2.2). En la implementación original también existían una serie de mensajes CQI que permitían a la estación base conocer las probabilidades de error de todos los enlaces y, utilizando dichas probabilidades se optimizaba en tiempo real la probabilidad de retransmisión. El uso de este tipo de mensajes también ha sido suprimido.

Esta es otra de las diferencias fundamentales, el simulador original tenía un módulo que ejecutaba un algoritmo de optimización y, con ayuda de alguna información de la red, calculaba el valor óptimo de la probabilidad de retransmisión para la estación base. En la actualidad la estación base tiene una probabilidad de retransmisión preestablecida desde el principio de la simulación y permanece estática durante la duración de la misma.

Por otro lado, el simulador original no contemplaba nada acerca del modelo de canal. Las probabilidades de error de cada enlace eran estáticas y definidas mediante parámetro al inicio de las simulaciones. Esto no permitía garantizar unos resultados realistas por lo que se optó por el uso de diversos módulos que simulan las condiciones de un canal con

fading, lo que permite realizar unas simulaciones mucho más ajustadas a la realidad de las redes celulares.

### 3.2.2. Estación Base

El módulo encargado de simular la estación base se llama *sender* y su funcionamiento es sencillo. Este módulo (al igual que el resto de la red) actúa de acuerdo a una serie de slot temporales que vienen definidos (en segundos) por el parámetro “TTI\_interval” (definido en el correspondiente fichero omnetpp.ini). En cada slot temporal el módulo envía un mensaje por cada canal disponible a los destinos a los que corresponda. Para intentar hacer el envío lo más equitativo posible se sigue un algoritmo de planificación del tipo *round-robin* para asignar los canales pero, aún así, el módulo sigue unas directrices concretas en cada ronda de envíos:

1. Usuarios con canal asignado pero cuyas tramas no han sido enviadas todavía.
2. Usuarios con canal asignado y cuyas tramas ya han sido enviadas previamente (probabilístico).
3. Usuarios sin canal asignado.
4. Resto de usuarios.

Como se puede apreciar, la estación base intenta enviar primero tramas a los usuarios a los cuales el algoritmo de *round-robin* les ha asignado canal y, además, tengan una trama nueva para enviar (es decir, la última trama que enviaron ya ha sido confirmada). Tras enviar estas tramas se procede a enviar las tramas de los usuarios que tienen canal asignado pero cuyas tramas ya se han enviado con anterioridad, por lo que se trata en realidad de un reenvío. Uno de los objetivos de este proyecto (y de los relays cooperativos en general) es reducir la tasa de reenvío de la estación base delegando esta tarea en los relays por lo que esta tarea se realiza en base a una probabilidad (definida en el fichero de configuración con el nombre de “p\_nS”). Siguiendo esa probabilidad la estación base “decide” si reenvía o no la trama. Después de agotar las tramas a reenviar pasa a la tercera opción que, siempre que queden canales libres, enviará tramas a usuarios sin canal asignado (utilizando para ello el algoritmo de *round-robin*). Por último, si después de todo todavía quedan canales libres se envía al resto de usuarios que queden pendientes.

Cuando se recibe un ACK de un destino determinado lo primero que hace es comprobar su validez (que la trama confirmada se corresponde con la última trama enviada); una vez confirmada la validez se incrementa el número de secuencia (SN) de la próxima trama a enviar para ese destino y se desmarca el flag que indica si esa trama es o no nueva (FrameSent), si el destino que confirma la trama tenía un canal asignado se le quita y mediante *round-robin* se traspasa dicho canal al siguiente destino sin canal asignado.

La estación base incorpora además un método que le permite tomar muestras de datos estadísticos de interés y poder detener la simulación en caso de que el dato que queremos comprobar se encuentre dentro de unos intervalos de confianza determinados, permitiendo de esta manera acortar considerablemente el tiempo de simulación en el caso de muchas simulaciones seguidas.

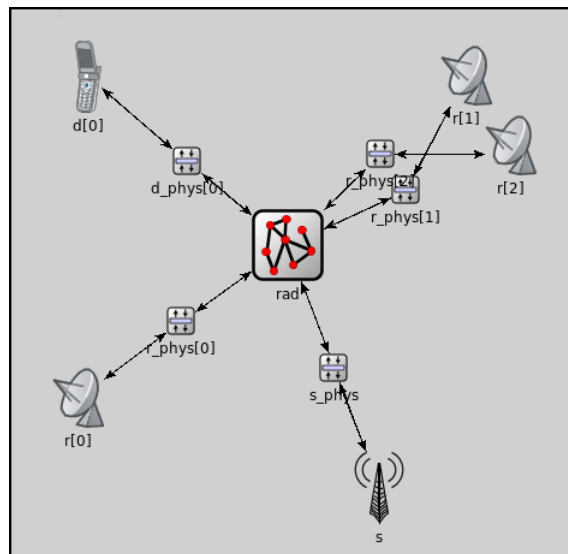


Figura 3.1: Ejemplo genérico de una red en el simulador, 3 relays y 1 destino.

### 3.2.3. Relays

En cada slot temporal, el módulo *relay* intenta reenviar todas las tramas que tenga almacenadas (una por destino como máximo) con una determinada probabilidad (definida por el parámetro “p\_nR”). Mientras queden tramas por reenviar o canales disponibles el relay enviará copias de los mensajes almacenados a los correspondientes destinos. Una cosa que hay que dejar clara es que, los mensajes enviados por un relay pueden ser recibidos por el resto de relays (en caso de que existan y de que las pérdidas del canal lo permitan) por lo que un relay puede recibir varias veces una trama e incluso recibir tramas con distintos SN en el mismo slot. Por otra parte, al igual que las tramas recibidas, también los ACK que envían los destinos (u otros relays) son almacenados y reenviados en cada slot temporal (el parámetro “channels” definido en el fichero de configuración omnetpp.ini indica el número de canales del enlace de subida (*uplink*) y del enlace de bajada (*downlink*), es decir, el valor de “channels” indica la mitad de los canales reales de que dispone el relay, ya que tendrá los mismos de subida que de bajada).

Cuando un módulo relay recibe una trama de datos, lo primero que se hace es comprobar si ya existe alguna trama anterior almacenada para ese destino, en caso de que no exista ninguna anterior el relay simplemente almacena la trama y activa el temporizador correspondiente. Por el contrario, si existiera ya una trama anterior guardada para ese destino, se comprueba su número de secuencia; si la trama recibida tiene un número de secuencia menor que la última almacenada se elimina directamente (hay que evitar que los relays almacenen datos obsoletos) y, en caso contrario, se elimina la almacenada y se guarda la nueva, activando además un nuevo temporizador (cancelando el anterior en caso de que existiera).

En el caso de recepción de un ACK el comportamiento es similar. Ahora lo primero es comprobar si está almacenada en el relay la trama que confirma el ACK recibido, en caso de que el ACK confirme la misma trama o una posterior la trama almacenada se elimina y se cancela el temporizador. Por otro lado, se comprueba si existe algún ACK almacenado



procedente de ese destino, en caso de existir se comprueba su número de secuencia para ver si es el mismo o es anterior o posterior, en caso de ser anterior simplemente se elimina el recibido, si es similar o posterior se procede a eliminar el almacenado y se guarda el nuevo, reiniciando o activando el temporizador correspondiente.

En cuanto a los temporizadores, se incluyen como mecanismo para no almacenar eternamente tramas obsoletas. En caso de que una trama determinada para un destino concreto no haya sido confirmada (o bien se haya recibido una trama con número de secuencia mayor) en el tiempo definido por el parámetro “tempR” es eliminada, con lo que se permite el ahorro de recursos evitando, como ya se ha comentado, el almacenamiento de tramas obsoletas.

### 3.2.4. Destinos

Los destinos están implementados en el módulo *destination*; el módulo, en sus comienzos no sabe cuál es su dirección de red (su *ID*, será asignado al recibir el primer mensaje desde la estación base. Su funcionamiento es el más sencillo de todos los módulos. Al recibir una trama comprueba si es la que está esperando (por el SN), se incrementa el SN, se actualiza la variable que define la dirección propia (ID) y se activa el flag para enviar un ACK.

En cada slot temporal solo envía un ACK si ha recibido antes una trama (correcta o incorrecta). En el caso de que la trama recibida sea incorrecta el destino responderá con un ACK indicando el SN de la última trama que ha recibido. En resumen, el destino solo enviará ACK en el caso de que haya recibido antes una trama, y no se haya enviado ningún ACK para dicha trama (tanto para indicar si es correcta o no se enviará solo un ACK por cada trama recibida).

### 3.2.5. Modelo del canal

Para la descripción del canal radio son necesarios diversos módulos independientes que se encargan, cada uno de ellos, de una parte concreta del canal. Existe un módulo que define la capa física del modelo, otro módulo que hace las veces de “controlador”, ya que se encarga del reparto de mensajes y, por último, dos módulos que en conjunto nos permiten simular un canal inalámbrico de acuerdo a unos modelos de movimiento, propagación y desvanecimiento tipo Rayleigh. El primero de estos módulos se encarga del movimiento y el segundo del cálculo de la ganancia del canal. Estos módulos son parte de un código libre para OMNeT++, denominado *ChSim*, desarrollado en la Universidad de Paderborn (Alemania) por el *Computers Networks Group* [18], y convenientemente modificado para su uso en este proyecto.

#### 3.2.5.1. Capa física

El módulo correspondiente a la capa física se llama *PhysicalLayer* y su trabajo consiste en encapsular los paquetes procedentes de la capa superior para poder mandarlos a través del canal radio (encapsula *Frames* dentro de *radioFrames*) así como desencapsular los mensajes procedentes del canal para entregárselos a la capa superior. Cada módulo

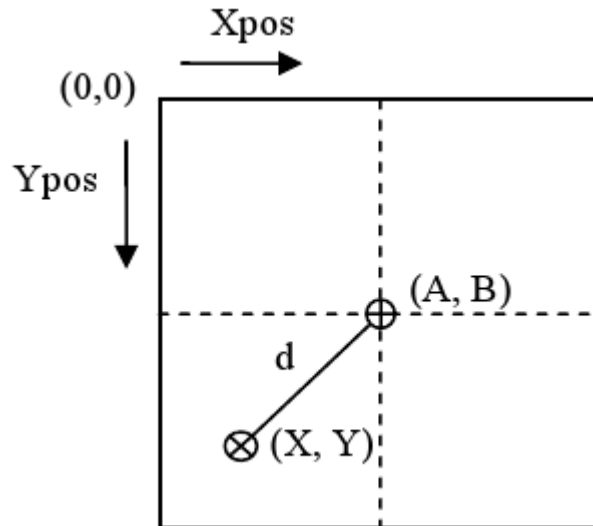


Figura 3.2: Sistema de coordenadas del módulo de movilidad

que deba conectarse al controlador de canal necesita hacerlo a través de este módulo. Es aquí donde se realizan los cálculos, para cada paquete recibido desde el canal, de su probabilidad de error de bit (BER) en función de la potencia con la que se recibe, la longitud del mensaje, la figura de ruido... Este es también el módulo encargado de detectar si un mensaje ha llegado con error y, en tal caso, descartarlo. El módulo incluye un parámetro llamado “Attenuation” que permite definir obstáculos virtuales en la comunicación entre la estación base y cualquiera de los módulos. Basta con definir el valor de atenuación (en dB) que se desee y éste se aplicará sobre el enlace entre la estación base y la capa física en la que se defina dicho parámetro (únicamente).

### 3.2.5.2. Movilidad

El módulo recibe el nombre de *ms* y su función es calcular la posición en tiempo real de un objeto en movimiento siguiendo alguno de los patrones disponibles. Como ya se ha comentado, este módulo emula el movimiento de cualquier módulo, actualizando su posición dentro de un área rectangular definida por el usuario en el fichero de configuración. En esta cuadrícula se emplea un sencillo sistema de coordenadas:

Como vemos, el origen de coordenadas se encuentra en la esquina superior izquierda. Se asume que la estación base (Sender) se encuentra en el punto central (A, B), por lo que la longitud del enlace radio ( $d$ ) entre la estación base y cualquier otro módulo es igual a la distancia entre las coordenadas del módulo en cuestión (X, Y) y el punto central (A, B). Proporciona diversos patrones de movimiento (*mobilityModel*), incluido uno en el que el módulo en cuestión se mantiene quieto. En el simulador, los únicos módulos que incorporan movimiento son los destinos. Estos utilizan un movimiento circular respecto al punto central, con lo que la distancia respecto al punto central permanecerá constante. Al ser la distancia el factor que determina las pérdidas por propagación, el hecho de mantenerla constante provoca que las pérdidas por propagación sean constantes. La variabilidad de las pérdidas estará determinadas por tanto por el modelo de fading tipo Rayleigh. En su

versión original, los módulos de movilidad pueden simular tres tipos de movimiento distinto, un movimiento circular (el utilizado en las pruebas de este proyecto) y los llamados *Randow Way Point* y *Manhattan Grid*. Otra de las modificaciones ha sido el añadir un cuarto tipo de movimiento que, en realidad no es tal, puesto que es una opción para que el módulo en cuestión se quede quieto, sin movimiento (modelo para la estación base o los relays). Este módulo, en su versión de la Universidad de Paderborn, utiliza el paso de mensajes entre los módulos para actualizar el estado del canal. Debido a que en el simulador se requieren un número considerable de módulos para las simulaciones y que el aumento del número de módulos hace crecer el número de mensajes de manera cuadrática, se han modificado ambos módulos para permitir las llamadas directas a sus métodos desde otros módulos, de esta manera no se satura la cola de eventos (FES) y el rendimiento general del simulador es muy superior. Para ello se ha añadido un método público que hace que, al ser llamado, hace que el módulo actúe tal y como si recibiera un mensaje. Estas llamadas son realizadas por el módulo controlador del canal (*ChannelController*), pero será explicado en profundidad en su sección correspondiente. Existe un módulo de movilidad por cada elemento transmisor/receptor del sistema, es decir, existe un módulo para la estación base, uno por cada relay, y uno por cada destino. Los destinos utilizan un patrón de movimiento circular mientras que la estación base permanece quieta. En el caso de los relays se puede elegir mediante el parámetro “mobilityModel” en el fichero omnetpp.ini si se quieren modelar como parte de la infraestructura de la red (con una posición fija) o como dispositivos en movimiento (usuarios cooperativos).

### 3.2.5.3. Estado del canal

Este módulo, llamado *channelStateCalc* es el encargado de recibir la distancia y otros parámetros de dos módulos concretos y calcular la ganancia del canal radio según el modelo de propagación con fading tipo Rayleigh. Al igual que el módulo anterior, este también ha sido modificado y se le ha añadido un método público que puede ser llamado directamente desde otros módulos de la simulación. Igual que en el caso anterior es llamado por el *ChannelController* tras la respuesta del módulo de movilidad y devuelve la ganancia del enlace correspondiente. En este caso, no puede existir un módulo por cada elemento, puesto que este módulo lo que hace es modelar un enlace concreto, por lo tanto, deben existir tantos módulos como posibles enlaces. Para este simulador se ha supuesto que existen enlaces entre todos los módulos del sistema (tanto de *uplink* como de *downlink*) excepto entre destinos. El resto de enlaces están modelados por un módulo “channelStateCalc” por lo que hay bastantes más que módulos de movilidad. En un principio los módulos originales estaban diseñados para actuar de manera conjunta con un módulo de movilidad por lo que también han tenido que ser modificados a este respecto para que diversos módulos de estado del canal puedan trabajar con un solo módulo de movilidad.

### 3.2.5.4. Controlador del canal

El módulo controlador del canal, llamado *ChannelController*, es el módulo más complejo puesto que hace de intermediario entre las capas físicas y es el encargado de modificar correctamente la potencia dependiendo del enlace del que se trate, para luego,

	BS	Relay[0]	...	Relay[TotalRelays]	Destino[0]	...	Destino[TotalDestinations]
BS	MS[0]	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc
Relay[0]	ChannelStateCalc	MS[1]	...	ChannelStateCalc	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc
...	...	...	...	...	...	...	...
Relay[TotalRelays]	ChannelStateCalc	ChannelStateCalc	...	MS[1+TotalRelays]	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc
Destino[0]	ChannelStateCalc	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc	MS[1+TotalRelays+1]	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
Destino[TotalDestinations]	ChannelStateCalc	ChannelStateCalc	...	ChannelStateCalc	...	...	MS[1+TotalRelays+TotalDestinations]

Figura 3.3: Ejemplo genérico de la matriz utilizada por el módulo ChannelController

entregarlas de nuevo a la capa física del módulo receptor. Para ello utiliza una serie de matrices que se actualizan en tiempo real y que sirven para poder acceder rápidamente a los valores, tanto de posición como de ganancia del canal de cada uno de los enlaces (excepto de los enlaces usuario-usuario ya que en este simulador no se contemplan). Además, este módulo (tal y como se ha comentado) tiene acceso directo a los métodos que calculan tanto la posición como la ganancia de los módulos “ms” y “channelStateCalc”.

En primer lugar tenemos una matriz que contiene los módulos propiamente dichos tanto de movilidad como de estado del canal. Esta matriz almacena todos los enlaces posibles del simulador. Para saber la ganancia de un enlace concreto accede a la posición del transmisor en las filas y a la del receptor en las columnas. Las posiciones están asignadas de tal manera que el primer elemento siempre es la estación base, después tantos relays como existan en la red y tras estos los destinos. En las posiciones de la diagonal (que representarían el enlace consigo mismo) se almacenan los módulos de movilidad referentes a cada uno de los elementos de la red, por tanto el módulo de movilidad de la estación base estará en la posición (1,1) de la matriz, el del primer relay (en caso de existir) en la (2,2) y así sucesivamente. A continuación se muestra, en la figura 3.3 la estructura de la matriz, que queda representada de una manera más clara con este ejemplo genérico.

Los módulos de estado de canal proporcionan el valor de la ganancia del canal cuando se le pasa la distancia, la velocidad y otra serie de factores, pero para hacer más eficiente el paso de mensajes existe otra matriz, de estructura similar pero que almacena los valores de ganancia para cada enlace y un array que contiene las posiciones (en tiempo real) de cada módulo.

Tanto los módulos de movilidad como los de estado de canal se crean en tiempo de ejecución dependiendo de los parámetros definidos en el fichero de configuración, es decir, dependiendo del número de relays y el número de destinos, por lo que no es necesario modificar el código fuente ni volver a compilar para variar los escenarios. E

Una vez que están creadas todas las matrices y los módulos necesarios (en la inicialización del módulo) se procede a explicar el funcionamiento del módulo. Anteriormente se ha comentado que la matriz con los valores de ganancia, así como el array de posiciones se actualizan en tiempo real. Esto no es absolutamente cierto puesto que los valores se van actualizando siguiendo un período definido por el parámetro “UpdateInterval”. Cada “UpdateInterval” segundos se realiza una actualización de los valores de posición y ganancia del enlace de todos los elementos presentes en el sistema (y que disponen de posición y enlace). Este módulo es también el encargado de calcular la distancia entre los elementos de la red para poder proporcionársela al correspondiente módulo controlador del canal y que le devuelva la ganancia del enlace. En cuanto a las velocidades, no es

necesario tener en cuenta velocidades relativas ya que los destinos son los únicos que se mueven (los relays y la estación base mantienen su posición durante toda la simulación) y como no pueden comunicarse entre sí, el cálculo de la velocidad se reduce a la velocidad del destino en cuestión.

El módulo controlador del canal actúa de manera diferente dependiendo de la procedencia del mensaje y del tipo del mismo. Si se trata de una trama de datos que proviene de la estación base, la política de actuación es reenviarla a todos los relays (modificando convenientemente el valor de potencia recibida) así como al destino para el que vaya dirigida. Por el contrario si la misma trama procede de un relay se envía al resto de relays (nunca a sí mismo de nuevo) y, como no, al destino correspondiente. En el caso de que sea un ACK la trama recibida, el procedimiento es similar; si proviene de un destino se entrega a todos los relays y a la estación base (nunca a otros destinos) mientras que si procede de un relay se entrega al resto de relays y a la estación base. En el código se encuentra definida la posibilidad de recibir algún tipo de trama sin identificar (trama genérica); en ese caso el controlador del canal actúa teniendo en cuenta la procedencia. Si viene desde la estación base se le envía a todos los relays y al destino que corresponda; si procede de alguno de los relays se entrega al resto de relays, al destino que aparece en la trama y a la estación base; por último, en el caso de que provenga de algún destino se entrega a la estación base y a todos los relays. La posibilidad de la trama genérica se contempla con expectativas hacia el futuro ya que en la actualidad no existe en el sistema ninguna trama distinta a los ACK y las tramas de datos.

### 3.3. Validación del simulador

La validación del modelo de canal no es estrictamente necesaria ya que no ha sido desarrollada para este proyecto, sino que forma parte de un proyecto de la Universidad de Paderborn (tal y como se explica en 3.2.5). Dicho proyecto cuenta con diversas publicaciones (acerca del mismo o utilizándolo) que lo avalan como por ejemplo [19, 20, 21]. En la propia página de OMNeT++ también aparece referenciado como modelo de simulación para canales con *fading* (aparece como “obsoleto” debido a que está desarrollado para las versiones 3.x; para la versión actual de OMNeT++ (la 4.0) existe otro simulador -basado en éste y otros más- llamado MiXiM [24] que ofrece una implementación más completa en el modelado de canales wireless). Por tanto se dan como válidos los resultados obtenidos por los compañeros de Paderborn para el modelado de un canal con *fading*. Las figuras 3.4(a) y 3.4(b) muestran el comportamiento del canal. La figura 3.4(a) muestra la ganancia de canal en función de varias velocidades y para un rango de frecuencias. En nuestro caso sólo se utiliza una portadora por lo que sería como un corte por la frecuencia de la portadora. Un caso similar al mostrado en la figura 3.4(b). Este modelo de comportamiento se corresponde con un modelo de fading de tipo Rayleigh.

Para validar el resto del simulador se debe comprobar si las variables de interés del sistema simulado se corresponden con el sistema teórico. Para ello se van a replicar los escenarios planteados en [6] (en la medida de lo posible), para después comparar los resultados obtenidos con los resultados teóricos. Se debe tener en cuenta que en [6] se incluye en los cálculos teóricos el uso de un optimizador que permite reajustar la probabilidad de

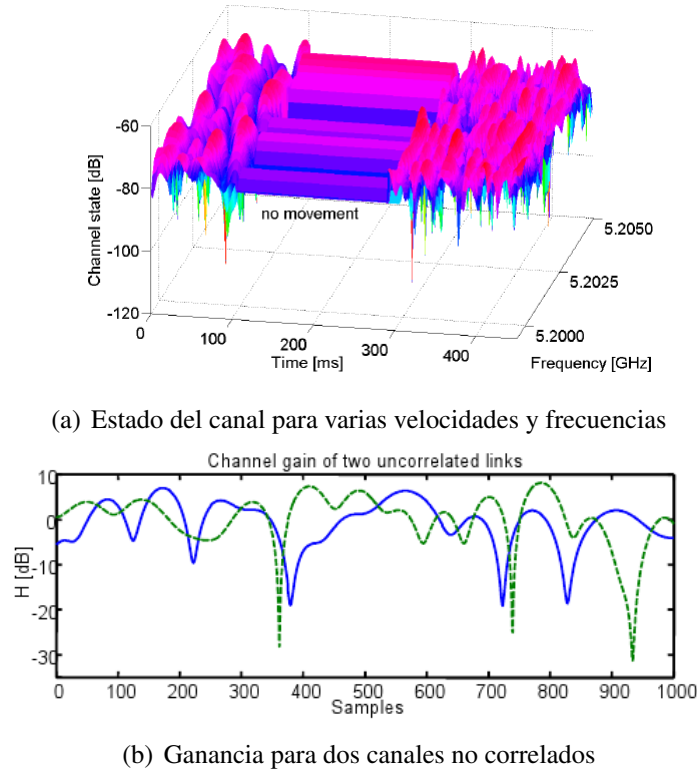


Figura 3.4: Ganancias de un canal con slow fading simulado mediante el código de ChSim

retransmisión de la estación base a la óptima teniendo en cuenta el estado de los canales. En el simulador ese optimizador no existe por lo que los resultados a comparar serán solo para una política de retransmisión determinística ( $p_S = 1$ ). Los escenarios están modelados en el estudio teórico mediante probabilidades de error en los enlaces. Para poder replicarlos, es necesario conocer las probabilidades de error para distintos tipos de enlaces en función de la distancia, la potencia de transmisión o la longitud de los mensajes. El modelo desarrollado por la universidad de Paderborn replica un canal inalámbrico para un dispositivo en movimiento calculando la ganancia del canal teniendo en cuenta el *fading*. Para realizar los cálculos de probabilidad de error se asume que el paquete se ha transmitido por el canal radio mediante una modulación BPSK. En esta modulación la BER se obtiene de la siguiente forma:

$$BER = \frac{1}{2} * \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right); \quad (3.1)$$

Donde  $E_b$  es la energía por bit y  $N_o$  es la densidad espectral de ruido.  $E_b$  se obtiene a partir de la potencia recibida (en Watios) y el ancho de banda (en Hertzios):

$$E_b = \frac{P_{RX}}{2 * BW}; \quad (3.2)$$

Donde BW es el ancho de banda del canal de transmisión.  $N_o$  se puede obtener fácilmente a partir de la constante de Boltzmann ( $K_B$ ), el factor de ruido (f) y de la temperatura de

referencia ( $T_0 = 290^\circ K$ ):

$$N_o = f * T_0 * K_B; \quad (3.3)$$

Ahora habrá que sustituir 3.2 y 3.3 en 3.1 para obtener el BER. Una vez conseguido, es sencillo obtener la probabilidad de error de paquete (PER) a partir de su longitud en bits (L) introduciendo 3.1 aquí:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (3.4)$$

Es necesario saber como varía el PER en función de diversos factores, lo que nos permitirá poder replicar los escenarios planteados en [6] que están basados en el PER de los enlaces directos. Para ello se han realizado diversas simulaciones con una estación base y un destino variando diversos parámetros, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

### 3.3.1. Comportamiento del canal

Se han realizado tres análisis distintos en función de los tres parámetros que, a priori, más directamente influyen en el PER. Dichos análisis están explicados y analizados en profundidad:

- **Distancia:** esta simulación se ha realizado para una estación base y destino de tal forma que la estimación del PER no está influenciada por la actuación de ningún relay. La potencia de transmisión, tanto de la estación base como de los destinos es de  $P = -10dBW$  y la longitud en bits de los paquetes es de 10.000 b. Se han evaluado distancias desde los 500 m hasta 10.000 m obteniendo los resultados mostrados en la figura 3.5.

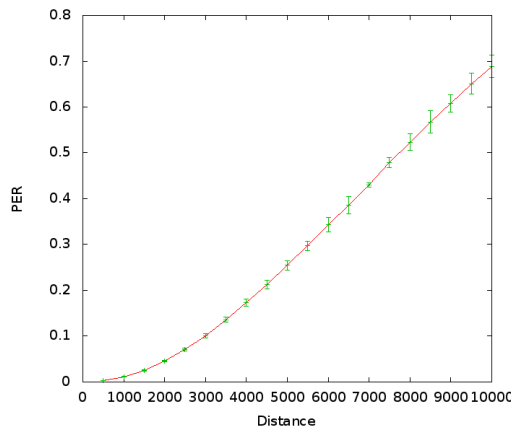


Figura 3.5: Evolución del PER en función de la distancia para un enlace directo

- **Longitud de paquete:** en este caso los parámetros son similares excepto en la distancia entre la estación base y el destino, que en este caso es igual a 6000 m. La potencia de transmisión de ambos nodos sigue siendo  $P = -10dBW$  y la longitud de los paquetes varía desde 1 bit hasta 60.000 bits. La variación del PER en función de la longitud en bits puede verse en 3.6.

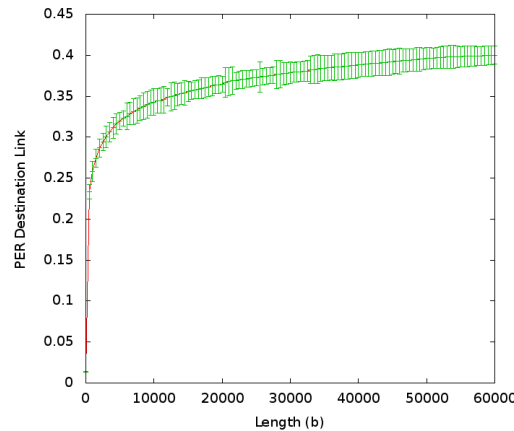


Figura 3.6: Evolución del PER en función de la longitud de las tramas (en b)

- **Potencia de transmisión:** el último de los análisis busca comprobar la relación entre la potencia de transmisión de la estación base y la probabilidad de error del canal directo con el usuario. Las condiciones son similares a los dos escenarios anteriores, es decir, longitud de paquete de 10.000 bits, distancia entre nodos igual a 6.000 m y, en el caso que nos ocupa, variación de la potencia de transmisión de la estación base desde -30 dBW hasta 0 dBW. La figura 3.7 muestra los resultados de esta simulación.

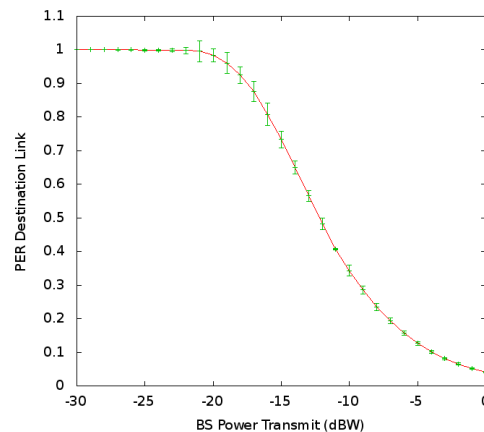


Figura 3.7: Evolución del PER en función de la potencia de transmisión de la BS

Ahora ya es posible replicar los escenarios del estudio teórico, con lo que se podrá comprobar la validez del simulador, o al menos su parecido con el estudio teórico.

### 3.3.2. Relay-enhanced cell

#### 3.3.2.1. Descripción

Este escenario está compuesto por la estación base, un usuario y un grupo de nodos relay que asisten la comunicación. Los nodos relay son parte de la infraestructura de la



red, es decir, son nodos específicos dedicados exclusivamente a la colaboración. Por este motivo uno de los parámetros que los caracteriza es que la probabilidad de retransmisión será la máxima ( $p_R = 1,0$ ), es también razonable pensar que dichos nodos habrán sido desplegados a una distancia de la estación base que produzca un enlace relativamente bueno ( $p_{SR} = 0,2$ ). Por otro lado si se han instalado nodos relay para asistir al usuario es razonable pensar que el enlace desde la estación base al destino está bastante deteriorado ( $p_{SD} = 0,5$ ), aunque el enlace desde los relays al usuario sí que será bastante bueno ( $p_{RD} = 0,1$ ); de otro modo el protocolo C-ARQ no sería demasiado útil. Por último se supone que los enlaces entre el grupo de nodos relay serán también suficientemente buenos ( $p_{RR} = 0,1$ ).

Para lograr replicar estas condiciones y basándonos en los resultados obtenidos en 3.3.1 es fácil modelar que para obtener una  $p_{SR} = 0,2$  es necesario situar los relays a una distancia de 4.500 m de la estación base. Por otra parte la estación base debe estar separada del destino unos 7.750 m si se quiere conseguir una  $p_{SD} = 0,5$ . Como última condición tenemos que  $p_{RD} = 0,1$ ; para cumplir esto el grupo de relays debe estar separado del destino unos 3.000 m. Si se juntan todas estas condiciones se puede comprobar que es imposible cumplirlas todas ya que los relays no pueden estar a la vez a 4.500 m de la estación base, a 3.000 m de los destinos y que estos a su vez estén a 7.750 m de la BS por lo que es necesario añadir una atenuación. Para ello se crea entre la estación base y el destino una atenuación de 1,2 dB. Así, para conseguir la misma  $p_{SD}$  ahora el destino está mil metros más cerca, con lo que aparecen dos posiciones para los relays que cumplen a la perfección las condiciones de partida. Para ampliar un poco más los resultados se puede añadir otro relay más justo a medio camino entre la estación base y los destinos (recordar que el parámetro de atenuación solo influye en los paquetes que vienen desde la estación base, no así desde los relays) que estaría a 4.125 m de la estación base y a 2.625 m de los destinos.

### 3.3.2.2. Resultados teóricos

Este escenario es analizado sobre dos políticas distintas en el estudio teórico. En la primera de ellas, la estación base tiene una probabilidad de retransmisión máxima ( $p_S = 1$ ), es decir, indiferentemente del número de relays y de las condiciones de la red, la estación base retransmite siempre que puede. Por otra parte, en la segunda opción la estación base varía según una técnica de optimización multi-objetivo conocida como “método del criterio global” [17]. De este modo distinguimos una configuración del protocolo C-ARQ determinística ( $p_S = 1$ ) y una configuración optimizada ( $p_S = p_S^*$ ). Tal y como se puede observar, la gráfica mostrada en la figura 3.8(a) presenta las mediciones del rendimiento para la configuración determinística ( $T_M$  y  $R_M$ ) así como las de la configuración óptima ( $T_O$  y  $R_O$ ) en función del número de nodos relay ( $N$ ). Se puede ver que, conforme aumenta el número de relays, la tasa de retransmisión de la estación base disminuye; esto es debido a que el algoritmo de optimización le asigna una menor probabilidad de retransmisión (se puede apreciar claramente la variación de la probabilidad de retransmisión ( $p_S$ ) en la figura 3.8(b)). Cabe destacar que esta estrategia tiene un impacto mínimo en el *throughput* global, tal y como representa la cercanía entre  $T_M$  y  $T_O$ . Por otra parte es importante observar que cuando el número de relays es mayor de 6, la estación base retransmite con

una probabilidad cercana a 0, lo que quiere decir que virtualmente delega todo el proceso de retransmisión en el grupo de cooperación formado por los nodos relay de la red.

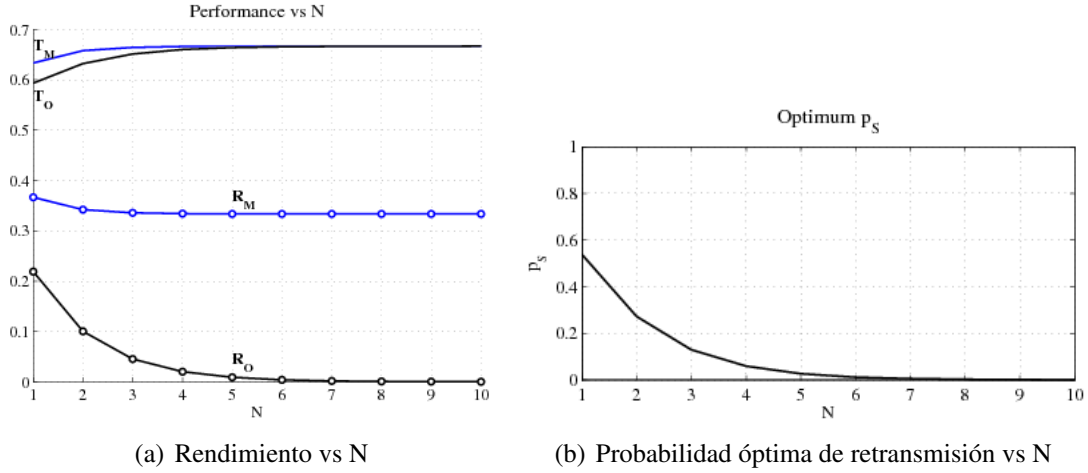


Figura 3.8: Throughput, tasa de retransmisión y probabilidad óptima de retransmisión frente a N

### 3.3.2.3. Resultados de simulación

Tal y como se ha descrito anteriormente, el escenario está compuesto por hasta tres relays operando bajo las condiciones arriba descritas, los resultados para la política determinística son los mostrados en la figura 3.9 mientras que para la política de retransmisión óptima se muestran en la figura 3.10.

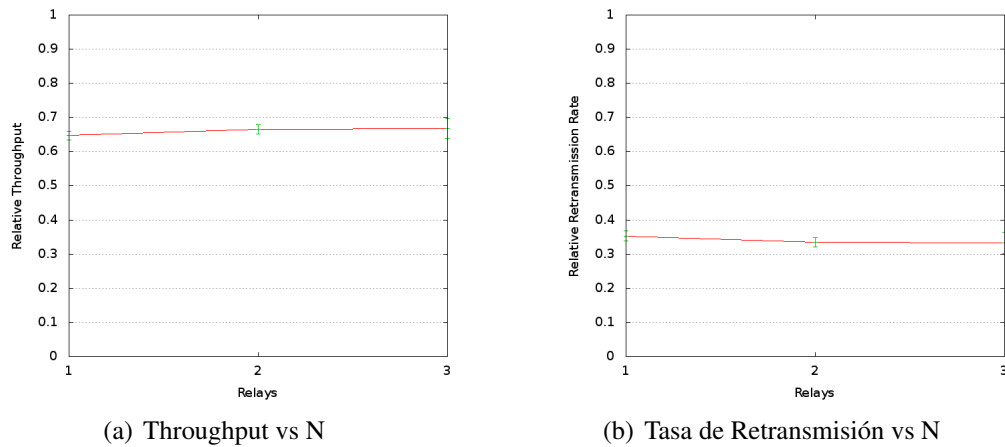


Figura 3.9: Tasas relativas de throughput y retransmisión respecto a N con  $p_s = 1$

### 3.3.2.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos, teniendo en cuenta los márgenes de error son bastante satisfactorios y se ajustan bastante a los resultados obtenidos en el estudio teórico. Si se

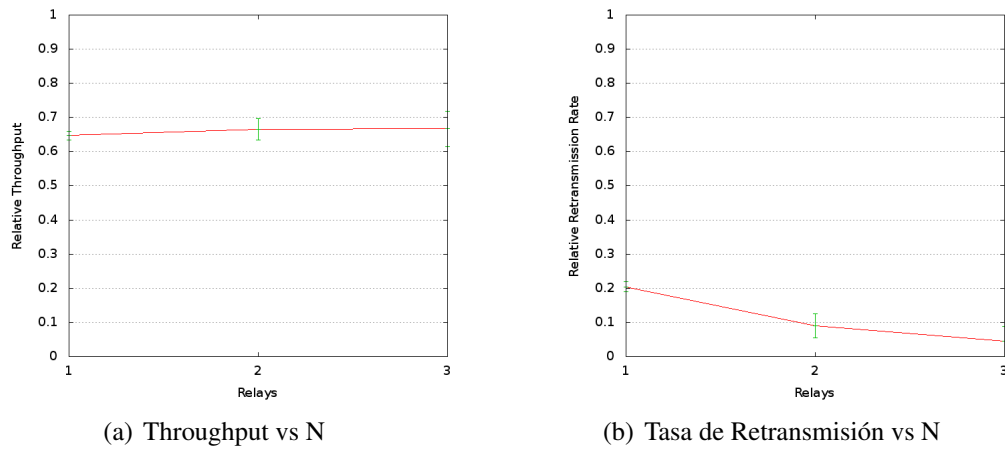


Figura 3.10: Tasas relativas de throughput y retransmisión respecto N con  $p_S = p_S^*$

comparan los valores de la figura 3.8(a) con los mostrados en las figuras 3.9 y 3.10 se puede comprobar que se ajustan bastante bien por lo que, al menos en lo que respecta a simular una infraestructura de red que disponga de relays, las simulaciones se ajustan bastante bien al estudio teórico.

### 3.3.3. Usuarios cooperativos

#### 3.3.3.1. Descripción

Este escenario es similar al anterior, una estación base, un usuario destino y un grupo de relays, la gran diferencia radica en que en este caso los relays no son nodos independientes, sino que se trata de otros usuarios que se encuentran cerca del usuario y que en un momento dado pueden colaborar en las retransmisiones. Así, es bastante realista suponer que los nodos relay en este caso ya no tienen dedicación absoluta ( $p_R = 0,2$ ). Por otra parte, es razonable pensar que si se trata de otros usuarios que pueden colaborar, estarán relativamente cerca del usuario destino, por lo que su distancia a la estación base será similar ( $p_{SD} = p_{SR} = 0,4$ ). Por otra parte, la distancia entre los relays (resto de usuarios que colaboran) y el usuario destino será pequeña ( $p_{RD} = p_{RR} = 0,05$ ). Para poder simular estas condiciones, puesto que ahora los relays se encuentra en movimiento (son en teoría usuarios, con sus pérdidas de fading incluidas) se le asigna a los relays una velocidad de movimiento de 1 m/s y un patrón de movimiento circular.

#### 3.3.3.2. Resultados teóricos

Al igual que el escenario anterior, éste también está analizado en el artículo [6] con las mismas dos configuraciones que el anterior; los resultados están mostrados en las figuras 3.11(a) y 3.11(b). Estas figuras muestran que la configuración óptima es también útil en este caso para reducir la tasa de retransmisión en la estación base. Sin embargo, a diferencia del escenario anterior, se requieren bastantes más nodos cooperativos para obtener el *throughput* máximo con la configuración óptima. Conforme aumenta el número de usuarios cooperativos,  $T_O$  se va acercando a  $T_M$  y  $p_S$  va decayendo, lo cual obviamente

reduce  $R_O$  incluso más. Analizando un poco las figuras mostradas se deduce que en este escenario el número de retransmisiones de la estación base tiene un mayor impacto sobre el *throughput* total de la red.

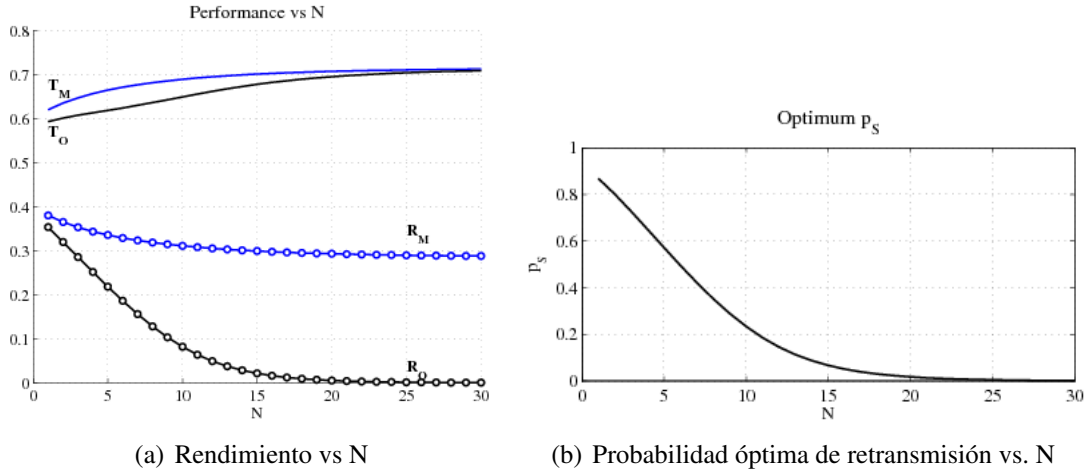


Figura 3.11: Throughput, tasa de retransmisión y probabilidad óptima de retransmisión frente a número de relays

### 3.3.3.3. Resultados de simulación

Al igual que en el caso anterior se muestran los resultados para el caso determinístico (figura 3.12) y para el caso óptimo (figura 3.13).

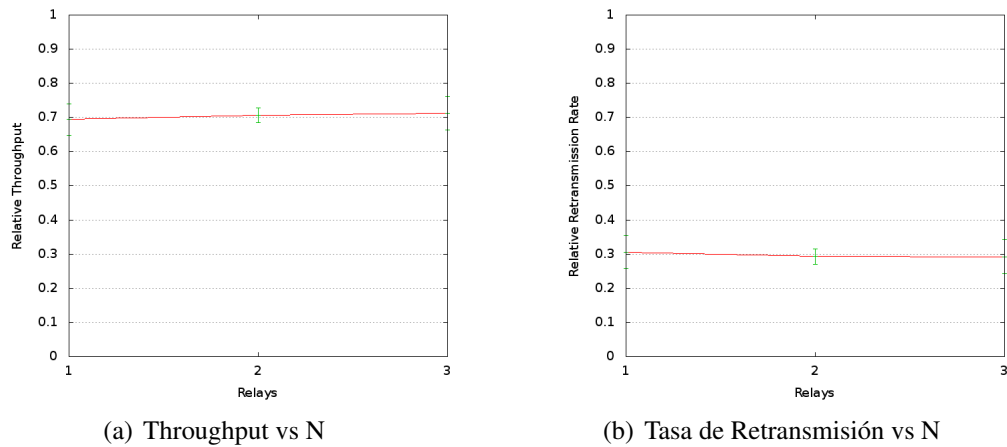


Figura 3.12: Tasas relativas de throughput y retransmisión respecto al número de relays con  $p_s = 1$

### 3.3.3.4. Conclusiones

Esta vez los resultados no son tan ajustados aunque, teniendo en cuenta los intervalos de confianza los resultados pueden darse también por válidos, aunque menos precisos que

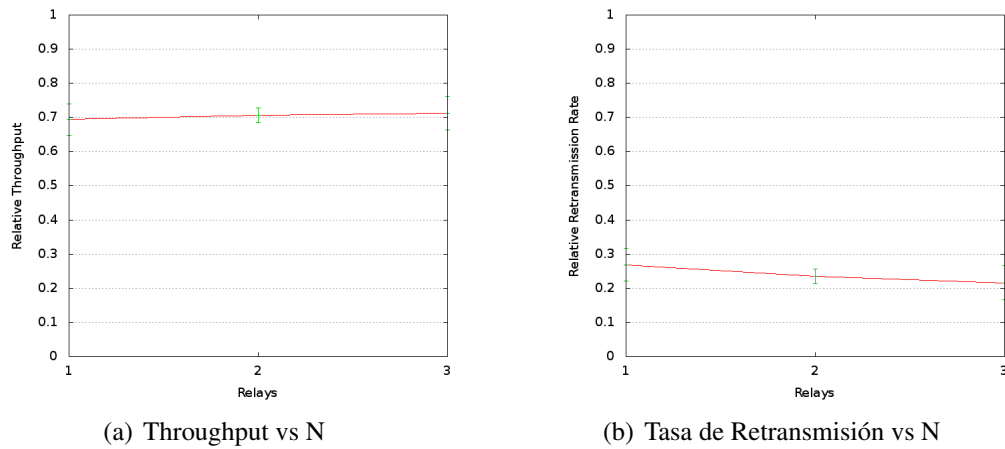


Figura 3.13: Tasas relativas de throughput y retransmisión respecto al número de relays con  $p_S = p_S^*$

en el caso del escenario anterior. Se puede observar como en el caso de la probabilidad óptima, la tasa de retransmisión de la estación base (figura 3.13(b)) disminuye conforme aumenta el número de relays ya que la probabilidad óptima disminuye (figura 3.11(b)) pero el throughput total no se ve afectado, al contrario aumenta ligeramente (figura 3.13(a)). El comportamiento es similar al descrito en el estudio teórico aunque los datos no se ajusten de manera exacta.



## Simulaciones y resultados numéricos

### 4.1. Nodos relay fronterizos

#### 4.1.1. Definición teórica

En este primer escenario el objetivo es averiguar como disminuye el PER, para un enlace entre la estación base y un destino si se añaden relays en determinado radio alrededor de la estación base, es decir, todos a la misma distancia de la estación base (y por tanto el mismo PER) como si se tratase de una frontera de relays. Otro de los objetivos es averiguar como influye la inclusión de relays en el resto de parámetros del sistema aunque, en principio, de manera secundaria. La figura 4.1 muestra de manera más precisa el escenario descrito.

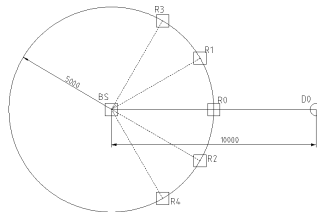


Figura 4.1: Esquemático del escenario “Nodos relay fronterizos”

#### 4.1.2. Resultados numéricos

Para este escenario se han obtenido las medidas de PER, tasas relativas de throughput (tramas confirmadas por usuario entre tiempo total) y retransmisión (de todas las tramas enviadas cuántas son retransmitidas), y una medida del retardo en la confirmación de los paquetes (desde que una trama se envía hasta que se recibe el ACK que la confirma). Las gráficas incluidas en la figuras 4.2 y 4.3 muestran dichas medidas representadas respecto

al número de relays. Los nodos relay se han añadido en el orden indicado en la figura 4.1 y la probabilidad de retransmisión de la estación base es  $p_S = 1$ .

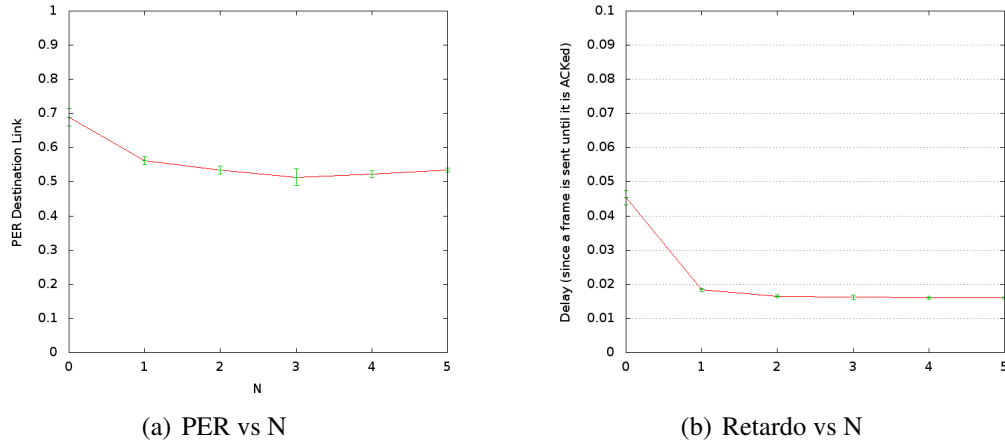


Figura 4.2: PER y retardo frente al número de relays con  $p_S = 1$

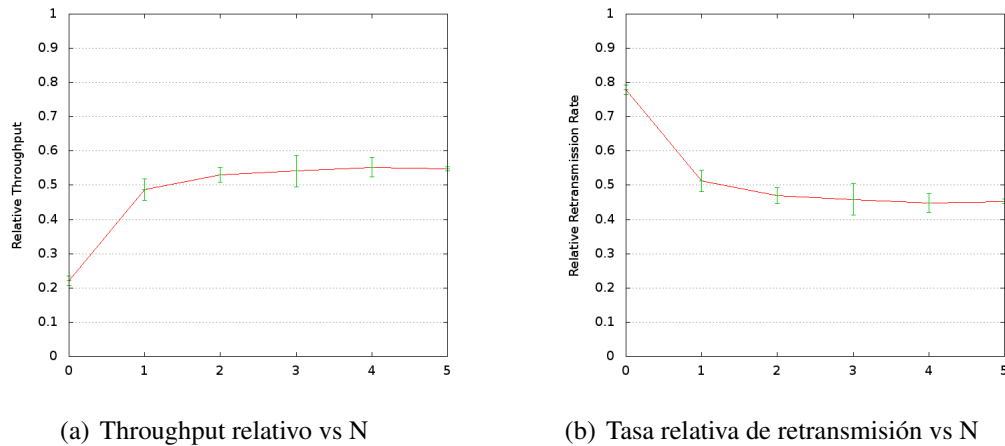


Figura 4.3: Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N con  $p_S = 1$

### 4.1.3. Conclusiones

La inclusión de relays en la red hace disminuir el PER de manera significativa, observando la figura 4.2(a) vemos como a partir del segundo relay la probabilidad de error se mantiene estable. A esa distancia, la inclusión del primer nodo relay en el sistema hace descender la probabilidad de error en más de un 17 %, pero a partir de ahí la disminución es de solo un 5 % para mantenerse ya relativamente estable con el incremento de relays. El comportamiento del resto de indicadores del sistema (retardos y tasas relativas) tiene un comportamiento similar. El retardo disminuye significativamente a partir del primer relay para estacionarse después en torno a los 0.02 s (el mínimo retardo es de 0.01 s ya que los canales del simulador no sufren retardos de transmisión ni de propagación por lo que el mínimo tiempo en recibir una trama es al siguiente slot temporal: 0.01 s). El



comportamiento de las tasas relativas es muy similar al caso de *Relay-enhanced cell* en [6]. El throughput real por usuario aumenta un 118 % con la inclusión del primer relay, con el segundo el incremento es bastante menor (del orden de un 10 %) y a partir de ahí se estabiliza. La tasa de retransmisión disminuye muy significativamente con la inclusión del primer relay y mantiene una ligera tendencia descendente. El comportamiento es muy similar en las 4 medidas realizadas. A priori, se puede concluir que para un solo destino, no parece demasiado útil introducir más de dos relays como indica la figura 4.1 alrededor de la estación base ya que las mejoras no son significativas y se estabilizan a partir del segundo relay. Aún así hay que tener en cuenta que la estación base tiene una  $p_S = 1$  por lo que no se aprovecha toda la capacidad de delegación de las funciones de retransmisión en los relays. Por otro lado, el hecho de que solo haya un destino en la red no permite aprovechar la reutilización de canales en la estación base, por lo que para múltiples destinos el protocolo debería revelarse más eficiente.

## 4.2. Nodos relay fronterizos con múltiples destinos

### 4.2.1. Definición teórica

Este escenario es muy similar al anterior, la principal diferencia consiste en que aquí se han incluido múltiples destinos para comprobar el comportamiento de la red en función de otros parámetros. Estos destinos han sido añadidos a la misma distancia de la estación base y dentro del arco formado por los dos últimos relays mostrados (R3 y R4) en la figura 4.1. Un dato interesante sería averiguar cuál es la mejor distancia para colocar la frontera de relays. Para comprobarlo se han hecho varias simulaciones variando el radio del arco alrededor del cual se han colocado los relays. Además, se han realizado más simulaciones con el mismo escenario para comprobar la variación del throughput total respecto a la probabilidad de retransmisión de la estación base. Para esta prueba los relays se han colocado en un radio de 5000 m de la estación base. Por otra parte, es interesante también conocer cuál es la mejor distribución de los recursos disponibles. ¿Se obtiene un mejor rendimiento con una estación base muy potente y unos relays de baja capacidad? ¿O por el contrario será mejor disponer de relays potentes capaces de transmitir más tramas en cada instante? Para intentar responder a estas preguntas se ha supuesto una configuración con veinte destinos y distintos valores para el número de canales disponibles en la estación base y los relays.

### 4.2.2. Resultados numéricos

En primer lugar, tenemos los resultados obtenidos del simulador para diversas distancias de los relays frente a la estación base. La configuración elegida para esta prueba ha sido de veinte destinos y cinco relays. La posición de los relays es la misma que la mostrada en la figura 4.1. Por su parte los destinos están regularmente distribuidos alrededor de un arco de centro la estación base y de ángulo, el formado por los dos últimos relays (R3 y R4). La estación base dispone de cinco canales mientras que cada relay dispone de tres.

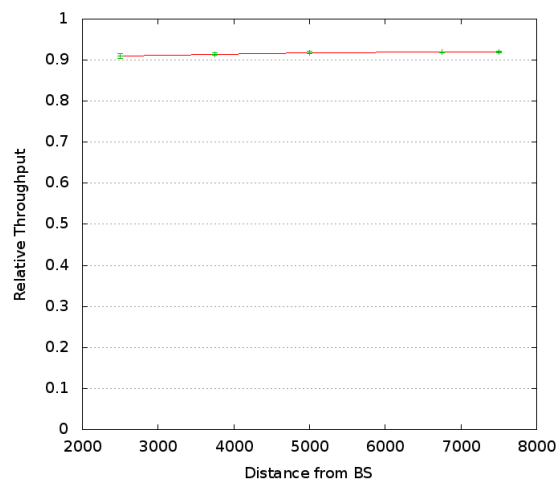


Figura 4.4: Tasa relativa de throughput frente a la distancia desde la estación base

Aquí se pretende observar el comportamiento de la red ante la variación de un parámetro tan fundamental para este proyecto como es la probabilidad de retransmisión de la estación base. A continuación se muestra la gráfica que representa la variación del throughput frente a  $p_S$ . En la figura 4.2.2, la probabilidad de retransmisión de los relays es  $p_R = 1$  mientras varía  $p_S$ . Para esta configuración se han colocado cinco destinos a 10.000 m de la estación base y los tres primeros relays mostrados en la figura 4.1. Tanto la estación base como los nodos relay disponen de dos canales para transmitir.

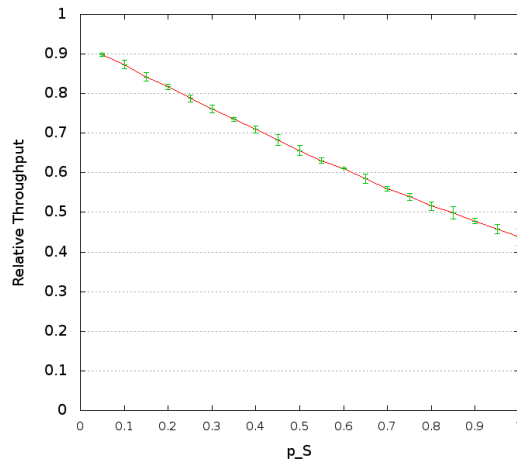


Figura 4.5: Tasa relativa de throughput frente a  $p_S$

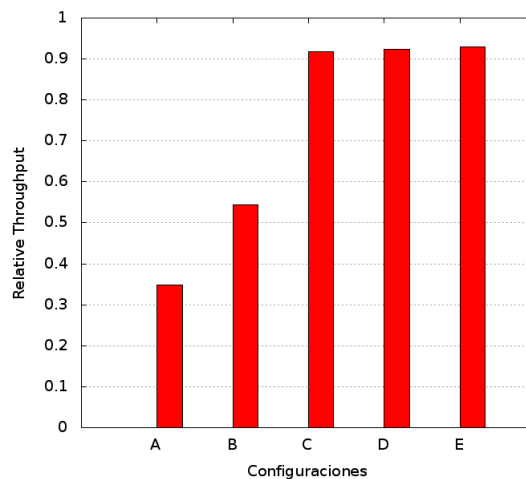


Figura 4.6: Throughput relativo obtenido para diversas configuraciones

Por último, se ha querido comprobar como influye la asignación de recursos al throughput total de la red. Para ello se han probado diversas configuraciones basadas en el escenario anterior. La diferencia estriba en la distribución de canales entre la estación base y los relays y en la cantidad de los mismos. La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos. A continuación se exponen las distintas configuraciones probadas:

- **Configuración A:** La estación base dispone de 15 canales para transmitir en cada slot temporal. Existen cinco relays que disponen solo 1 de un canal.

- **Configuración B:** En este caso la estación base dispone de 10 canales mientras que los relays de 2. Se proporciona mayor capacidad a los relays y se le disminuye a la estación base.
- **Configuración C:** Ahora la estación base cuenta únicamente con 5 canales mientras que los relays tienen 3. Se continúa la tendencia descrita en la anterior configuración.
- **Configuración D:** Para esta prueba se ha dotado a la estación base de 5 canales y se ha reducido a tres el número de relays. Éstos disponen de 5 canales cada uno para retransmitir.
- **Configuración E:** Por último, el número de canales de la estación base se ha reducido a 4. Ahora hay un relay menos (dos) pero disponen de 8 canales cada uno.

### 4.2.3. Conclusiones

En esta prueba se han realizado diversos experimentos en función de distintos parámetros. El primero de ellos consistía en variar la distancia a la que se coloca la frontera de relays para comprobar como influye en el throughput total esta distancia. Tal y como se puede ver en la figura 4.2.2 se puede observar un ligero aumento del throughput con la distancia. Este comportamiento puede deberse a que los nodos relay no se encuentran en movimiento, por lo que no sufren los desvanecimientos propios del fading, por tanto tendrá una mejor recepción de la estación base que el destino. Por otro lado cuanto más cerca se encuentre de los destinos (más distancia de la estación base) mejor será el enlace de reenvío entre los relays y la estación base por lo que puede explicarse ese aumento del throughput. Se abre por tanto una nueva línea de investigación para investigar el comportamiento de la red frente a la distancia frente a condiciones más realistas de pérdidas en el enlace. En segundo lugar se comprueba la variación del throughput frente a la probabilidad de retransmisión de la estación base. Contrariamente a lo que tradicionalmente se pensaba, conforme aumenta la probabilidad de retransmisión de la estación base se produce una pérdida casi lineal de throughput. Se muestran por tanto las ventajas de la delegación de las tareas de retransmisión a los relays. Por último, se ha realizado un análisis de diversas configuraciones para distintas distribuciones de los mismos recursos (20 canales). Se muestran mucho más eficiente los casos en los que los relays disponen de mayores recursos y menos la estación base. El throughput total de la red va aumentando conforme se dota a los relays (indiferentemente del número de éstos) de más canales para retransmitir. Incluso en la última configuración donde hay solo dos relays, el throughput total es mayor que en las anteriores debido a que el número de canales disponibles para los relays es mayor (16 entre los dos relays y 4 en la estación base).

## 4.3. Camino multi-salto

### 4.3.1. Definición teórica

Este escenario pretende establecer una situación donde la comunicación esté muy degradada entre la estación base y el destino ( $PER \simeq 0,8$ ). A partir de ahí, entonces, en el camino se irán añadiendo relays, con un enlace entre ellos bastante bueno ( $PER \simeq 0,05$  para una distancia de 2000 m.) para ver si la red proporciona, con la inclusión de muchos relays en línea, unas capacidades multisalto, y observar como repercute eso en las distintas medidas del sistema.

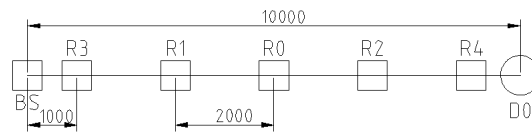


Figura 4.7: Esquemático del escenario “Camino multi-salto”

### 4.3.2. Resultados numéricos

Las medidas obtenidas son las mismas que en el escenario anterior (PER del enlace BS->destino, retardo y tasas relativas de throughput y retransmisión) y, al igual que en éste la  $p_S = 1$  por lo que no se tiene en cuenta la capacidad de delegación de la retransmisión por parte de la estación base. Por último hay que tener en cuenta que para esta simulación la velocidad del terminal es de 1 m/s por lo que, durante la simulación el movimiento no es demasiado hasta el final de la simulación, debido a ello el destino sigue estando “en línea” con los relays y la estación base durante toda la simulación.

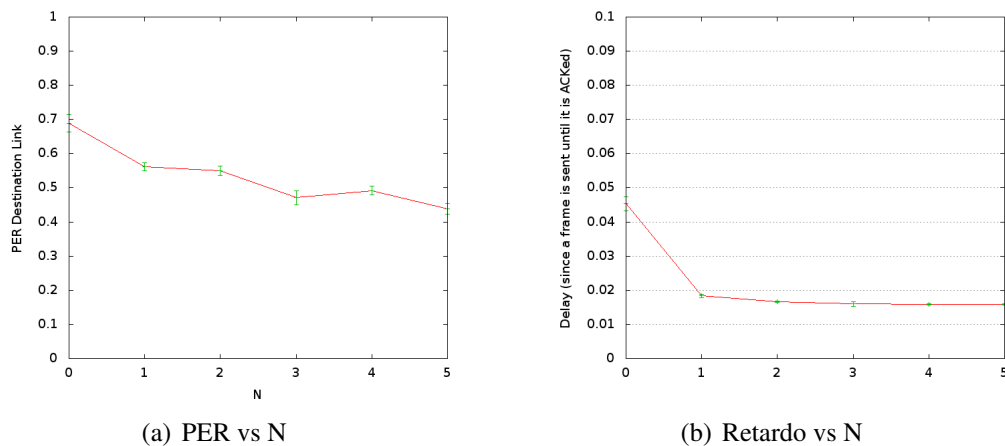


Figura 4.8: PER y retardo frente al número de relays con  $s = 1$

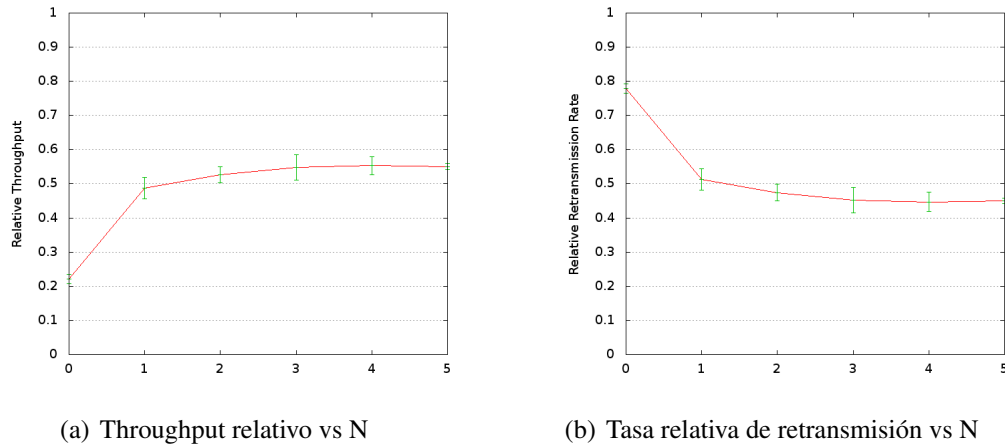


Figura 4.9: Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a  $N$  con  $p_S = 1$

### 4.3.3. Conclusiones

En este escenario se han obtenido unos resultados bastante satisfactorios. La PER inicial entre la estación base y el destino era de  $PER \simeq 0,7$  y al llegar al quinto relay ha descendido casi un 37 %. Por su parte, este descenso casi continuado de la PER no afecta de ninguna manera al retardo medio para confirmar los paquetes ya que como se puede ver se estabiliza a partir del primer relay. El resto de parámetros también se comportan de manera positiva, el throughput aumenta de manera significativa con la inclusión del primer relay para estabilizarse después mientras que la tasa de retransmisión se comporta de manera similar (pero en descendente).

## 4.4. Doble frontera con múltiples usuarios

### 4.4.1. Definición teórica

En este experimento se pretende utilizar los conceptos comprobados en los escenarios anteriores y ponerlos en funcionamiento en una simulación con múltiples usuarios. Para poder evaluar el rendimiento de la propuesta hecha en [6] se va a simular el mismo escenario bajo diversas condiciones. El escenario en cuestión consiste en una serie de terminales de usuario (doce en total), una estación base y dos “fronteras” de nodos relay, separadas 7.500 m y 15.000 m respectivamente de la estación base. Estas “fronteras” tienen distribuidos de manera regular hasta ocho nodos relay cada una, haciendo un total de 16 relays. La figura 4.10 muestra la colocación de los dispositivos en el escenario propuesto. A continuación se procederá a explicar en profundidad los distintos parámetros que distinguen cada una de las simulaciones.

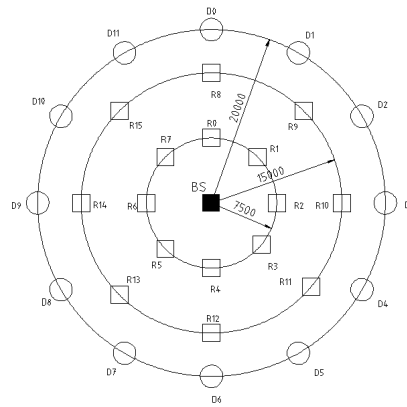


Figura 4.10: Esquemático del escenario “Doble frontera con múltiples usuarios”

#### 4.4.1.1. Reenvío obligatorio

Con el fin de poder evaluar en su justa medida la propuesta de delegación de las tareas de retransmisión hecha en [6], se va a realizar primero una simulación obligando a la estación base a reenviar de manera obligatoria, es decir, siempre que deba reenviar una trama lo hará y solo dejará de hacerlo cuando reciba el ACK correspondiente a la trama a reenviar.

#### 4.4.1.2. Reenvío probabilístico

Este caso es similar al anterior solo que, la estación base en lugar de reenviar siempre ahora lo hace de manera probabilística en función del número de relays presentes en la red. Mientras el número de nodos relay es menor que ocho la probabilidad de retransmisión de la estación base se mantiene  $p_S = 0,5$ . A partir del octavo relay la probabilidad de retransmisión va disminuyendo según la fórmula  $p_S = \frac{1}{N_{RELAYS}}$  por lo que en las últimas simulaciones la estación base habrá delegado casi por completo la tarea de retransmisión en los nodos relay ( $p_S = 0,0625$ ).

## 4.4.2. Resultados numéricos

### 4.4.2.1. Reenvío obligatorio

Cabe destacar que en un sistema real el número de canales de la estación base es, por lo general, menor que el número de destinos. Por este motivo y para tratar de darle mayor realismo a la simulación, el número de canales de la estación base es diez y el de los relays cinco (para un total de doce destinos). Se incluye (para el caso del retardo) una segunda gráfica con la misma representación pero ampliada a los últimos valores.

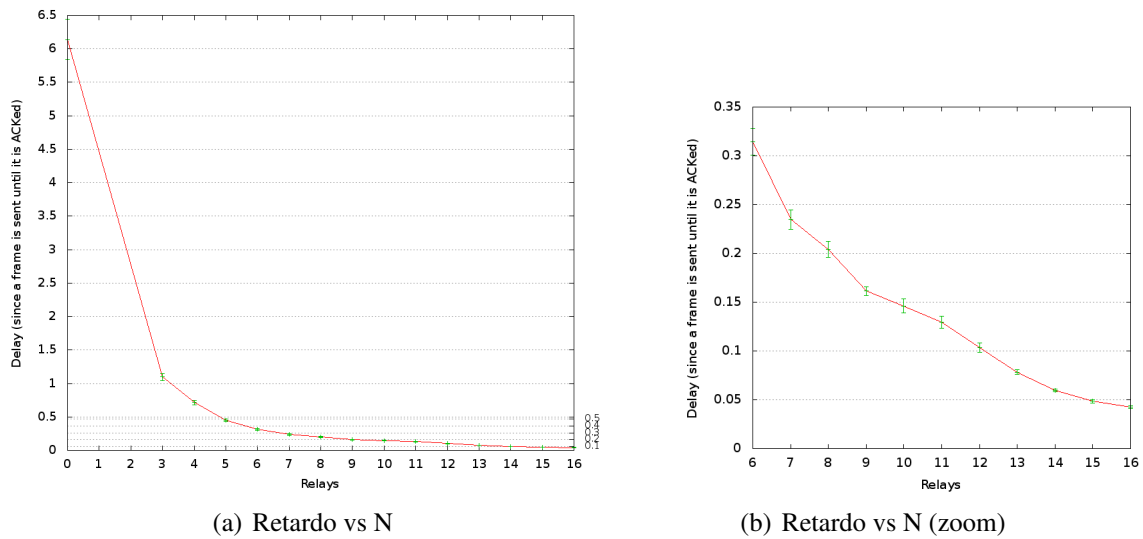


Figura 4.11: Retardo frente al número de relays

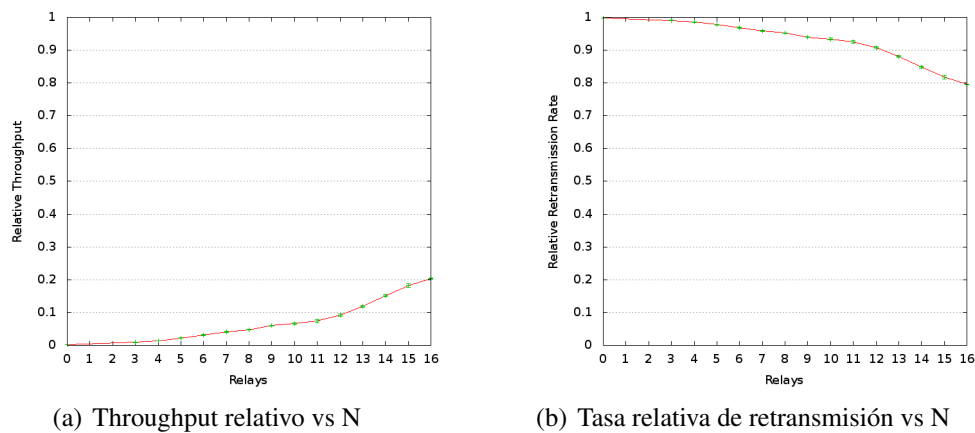


Figura 4.12: Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N

### 4.4.2.2. Reenvío probabilístico

En este caso vuelve a repetirse la cantidad de canales. Es importante recordar que a partir del octavo relay la probabilidad de retransmisión de la estación base va disminu-



yendo lo que explica el cambio de tendencia mostrado en las gráficas de la figura 4.14.

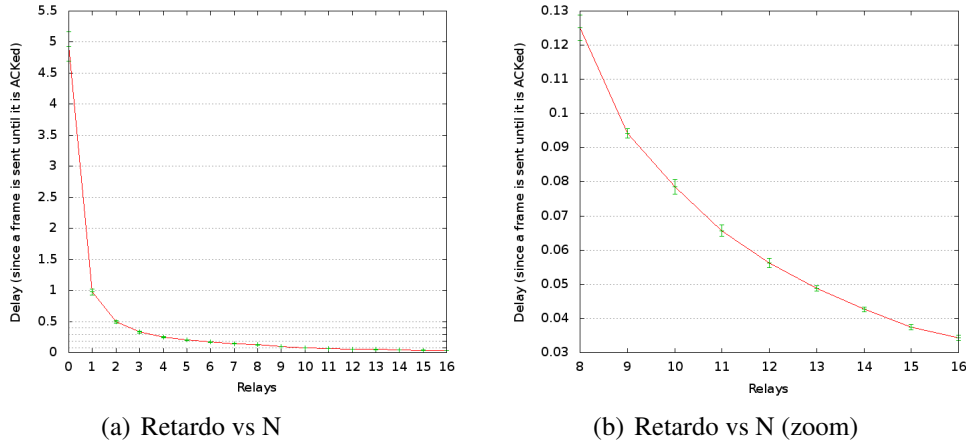


Figura 4.13: Retardo frente al número de relays

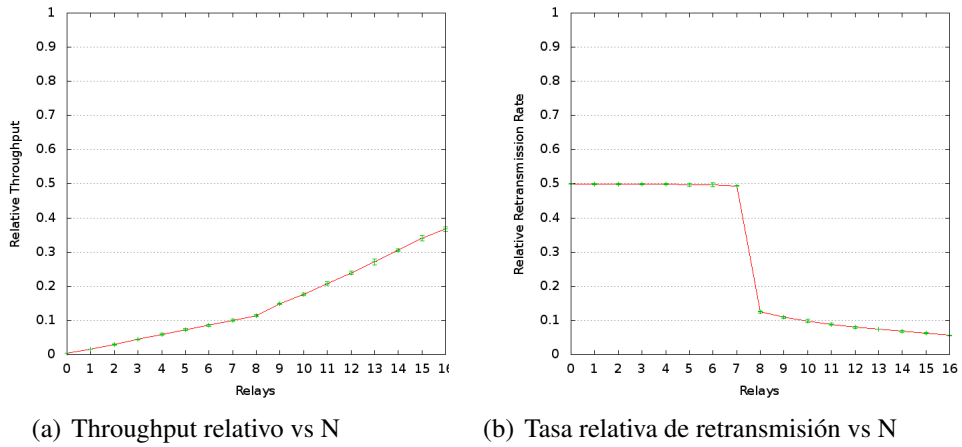


Figura 4.14: Tasas relativas de throughput y retransmisión frente a N

#### 4.4.3. Conclusiones

Antes de sacar conclusiones es preciso destacar diversos factores muy influyentes en el presente escenario. Para empezar, hay que tener en cuenta, a la hora de analizar los resultados, que se propone un escenario muy pesimista donde la calidad del enlace está muy degradada (para el enlace desde la estación base a cada destino, sin contar con los relays,  $PER \simeq 0,8$ ). Por otra parte, la política seguida a la hora de escoger una probabilidad de retransmisión para la estación base, no es ni mucho menos la óptima, sino una de implementación sencilla.

Teniendo en cuenta todo esto, los resultados conseguidos son espectaculares. Conforme aumenta el número de relays, el throughput total del sistema aumenta (tanto cuando  $p_S = 1$  como cuando  $p_S$  va descendiendo con el número de relays) mostrando un mayor

crecimiento cuanto más bajo es el valor de la probabilidad de retransmisión de la estación base. Los valores iniciales (sin relays) eran cercanos al 0 (comunicación imposible) llegando a alcanzar un throughput relativo de casi 0.4, es decir, un aumento de más del 10.000 % y con una tendencia ascendente frente al número de relays.

Es destacable observar como conforme aumenta el número de relays, el retardo medio de las tramas (tiempo que pasa desde que una trama es enviada hasta que la estación base recibe el ACK correspondiente) disminuye de manera drástica. El mayor descenso se produce, tal y como muestran las figuras 4.11(a) y 4.13(a), a partir de la aparición del primer relay hasta la inclusión del segundo, aunque mientras aumenta el número de relays se mantiene la tendencia descendente (como muestran las figuras 4.11(b) y 4.13(b)). Por otra parte la figura 4.14 muestra la variación en el comportamiento, tanto del throughput, como de la tasa de retransmisión, en el momento en que se hace el cambio de  $p_S = 1$  a  $p_S = \frac{1}{N_{RELAYS}}$  (octavo nodo relay). Este cambio de tendencia muestra perfectamente las ventajas de la disminución de la tasa de retransmisión en la estación base. La tasa de retransmisión disminuye drásticamente mientras que el throughput por usuario aumenta en mayor medida, mejorando a su vez los valores de retardo medio por trama.

## Conclusiones generales y líneas futuras

Se puede concluir que, en general, la política de delegación descrita en el artículo [6], en la que la estación base delega las tareas de retransmisión en los relays y aprovecha los canales sobrantes para introducir nuevas tramas en el sistema es útil para aumentar el throughput global de la red, puesto que como se ha visto, la delegación de las tareas de reenvío tiene un impacto positivo en el throughput total sin verse perjudicado el retardo medio de las tramas. Por supuesto, el valor de la probabilidad de retransmisión de la estación base es determinante tal y como se muestra en la figura 4.2.2. Por tanto, se abre una nueva línea de investigación en el mundo de los protocolos cooperativos y las redes basadas en relays, rompiendo con el clásico esquema de máxima prioridad en las retransmisiones tan tradicionalmente aceptado. Estas nuevas ideas pueden ser aplicadas en el diseño de nuevos mecanismos de planificación, en nuevas variantes de protocolos cooperativos y en el diseño de las próximas generaciones de redes celulares.

En cuanto al presente proyecto existen también muchas líneas abiertas para seguir con su desarrollo. Una de las principales podría ser la inclusión de un optimizador que calcule, en tiempo real, la probabilidad óptima de retransmisión de la estación base en función de las condiciones de la red. En las redes celulares es normal que la estación base obtenga este tipo de medidas a través los mensajes CQI [31]. Siguiendo con las mejoras para el actual simulador, podría incluirse un simulador más realista de las condiciones de canal, que incluya, no solamente el fading, sino tantos tipos de pérdidas como se estime oportuno. También podrían incluirse los retardos correspondientes a la transmisión y la propagación por el canal teniendo en cuenta las distancias. Otra característica que ayudaría a proporcionar realismo al simulador podría ser la implementación completa de los enlaces. Aunque en la actualidad ya hay un canal de subida y uno de bajada, el de subida solo se utiliza para enviar los mensajes de confirmación. Sería interesante ampliar las funciones para hacer que los usuarios enviaran mensajes a otros usuarios a través de la estación base. En definitiva, todo lo que sea acercar el funcionamiento del simulador a las condiciones reales proporcionaría mayor veracidad a los resultados obtenidos con él.



# Performance Evaluation of Multiple-Relay Cooperative ARQ Strategies for Mobile Networks

## Abstract

In Cooperative Automatic Repeat reQuest (C-ARQ) protocols, one or more nodes can act as relays, collaborating in the frame retransmission process between a sender and a destination node. In the framework of a broadband mobile access network, we consider a relay enhanced cell where the sender represents the base station, and an undefined number of relays can cooperate with a single user (destination). In this paper we present a Markov model complemented with a reward model to analyze the throughput performance and the efficiency in the bandwidth utilization at the base station, highlighting a clear tradeoff between them. Both performance metrics are balanced by means of a multi-objective optimization algorithm resulting in a retransmission strategy for the access node that notably improves the bandwidth efficiency while maintaining the throughput very close to its maximum. The benefits of the proposed approach are evaluated in two scenarios. In the first one, the relays are part of the network infrastructure. In the second one, the relays are cooperative users.

## Introduction

The use of cooperative relays in future mobile access networks is considered a promising approach to enable the deployment of 4G technology [32] [33] [34]. Additionally, in cooperative diversity environments, Cooperative Automatic Repeat reQuest (C-ARQ) protocols are receiving increasing attention. In this paper we study a C-ARQ system in a time-slotted radio interface, where signals from different nodes do not collide, the frame sending process follows a stop and wait operation and ACKs arrive without errors. This scenario is similar to previous works [35] [36] [37]. We investigate the performance in two different scenarios: first, a relay enhanced cell [38] where the relays are part of

the network infrastructure. Second, a situation where some users join into a collaborative group and form a cluster.

Our model includes the concept of cooperation group [35], which consists of a certain number,  $N$ , of relays (R) assisting one communication link between a sender (S) and a destination (R), as depicted in Fig. A.1. This figure shows the probability of incorrect frame reception, or frame error ratio (FER), in the *direct link* ( $p_{SD}$ ), in the *relay links* ( $p_{SR}$ ) and in the *access links* ( $p_{RD}$ ). The innovative aspects of our model are: First, we consider that retransmissions from a relay can be overheard by other relays, which contributes to increase the number of relays with a correct copy of the frame in subsequent time-slots. The FER among relays is  $p_{RR}$ . Second, each relay with a copy of the frame retransmits it with certain probability ( $p_R$ ). Third, the sender also retransmits with certain probability,  $p_S$ .

The probabilistic retransmission strategy is the base of our proposal. This paper shows that, by an accurate setting of  $p_S$ , considering the FER of the links and the number of relays, it is possible to increase the availability of bandwidth resources at the base station, while achieving a throughput very close to the deterministic strategy ( $p_S = 1$ ). Thereby, in a time-slot not assigned to retransmission, the radio resources allocated to the link between the sender node and the receiver node are released. The sender can re-allocate these resources temporarily to other links, introducing new data in the network, resulting in a more efficient use of the available bandwidth. In many existing and future radio access networks this is possible because resource allocation is done in a slot-by-slot basis. Two examples of this are the High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) [39] and the WINNER 4G concept [38]

Probabilistic retransmission has been previously considered in a recent work [40] as a strategy to balance cooperation and collision probability in order to achieve smaller latencies, while our work is focused in collision-free networks, which is the most usual case for cellular access environments. Other works like [35], [36] and [37] consider a deterministic retransmission scheme at the source node. In contrast to these previous works, we address the issue of increasing the bandwidth efficiency by reducing the amount of retransmissions performed at the base station, showing the tradeoff between this goal and the user throughput, in a single-destination scenario. We develop a Markov-reward model of the system and combine it with a multi-objective optimization strategy to balance both performance metrics. Numerical results obtained in very different scenarios show that a remarkable retransmission rate reduction can be obtained with an almost negligible decay

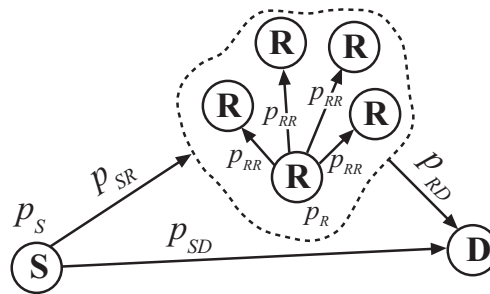


Figura A.1: Schematic diagram of the system analyzed

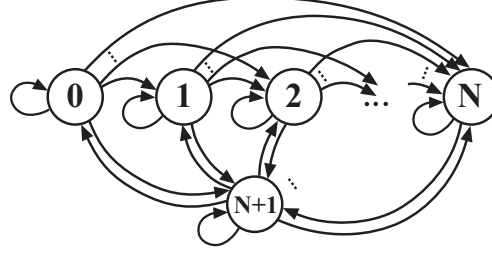


Figura A.2: Discrete Time Markov Chain modeling the operation of the system

of the user throughput, in a single-destination scenario. When considering multiple destinations, the transmission opportunities released by the retransmission rate reduction at the base station can be assigned to the transmission of new frames, increasing the overall throughput of the cell, which is the ultimate goal of our proposal.

The rest of the paper is organized as follows. The Markov model of the system is summarized in Section A. This model is used in Section A to compute the performance metrics of the system. Section A presents the strategy to balance throughput and retransmission rate at the base station. Numerical results are discussed in Section A. Finally, Section A outlines the conclusions of this work.

## System Model

The analysis relies on a Discrete Time Markov Chain (DTMC), in which the state of the system is denoted by the number of relays that have correctly decoded the frame. An additional state is added, which represents the reception of the frame at D. Therefore, the state space of a system with  $N$  relays is  $\Omega = \{0, 1, \dots, N, N + 1\}$ , where  $N + 1$  is the state representing a correct frame decoding at D. Because this event implies a new frame transmission from S, there may be a transition from state  $N + 1$  to any other state. However, because it is assumed that relays do not discard their copy of the frame during the retransmission process, the transitions among other states ( $i \rightarrow j$ ) can only occur if  $i \leq j$ .

A diagram of the DTMC model for the system is shown in Fig. A.2. In order to compute the transition probabilities, the following events are defined: frame reception at D ( $D$ ), frame retransmission from S ( $S$ ), frame retransmission from any relay ( $L$ ), and their corresponding complementary events ( $\bar{D}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{L}$ ). In addition, let  $A_n$  denote the reception of the frame at  $n$  additional relays, i.e. at  $n$  relays that have not received the frame in previous time-slots. Transition probabilities can be defined in terms of these events and their computation imply probabilistic and combinatorial analysis. Let us consider first the probability of a generic transition  $i \rightarrow j$ , where  $N + 1 > j > i > 0$ . This probability is given by:

$$p_{i,j} = P\{S \wedge \bar{L} \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} + P\{S \wedge L \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} + P\{\bar{S} \wedge L \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} \quad (\text{A.1})$$

where the first term is obtained from the probabilities of the system, resulting in:

$$P\{S \wedge \bar{L} \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} = \binom{N-i}{j-i} p_S p_{SD} (1 - p_{SR})^{j-i} p_{SR}^{N-j} (1 - p_R)^i \quad (\text{A.2})$$

the second term is given by:

$$P\{S \wedge L \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} = \binom{N-i}{j-i} \sum_{k=1}^i \binom{i}{k} p_S (1 - p_R)^{i-k} p_R^k (p_{SR} p_{RR}^k)^{N-j} (p_{SD} p_{RD}^k) \cdot \left( (1 - p_{SR}) + p_{SR} \sum_{m=1}^k \binom{k}{m} p_{RR}^{k-m} (1 - p_{RR})^m \right)^{j-i} \quad (\text{A.3})$$

and the third term is obtained from (A.3) by replacing the term  $p_S$  with  $(1 - p_S)$  and the term  $p_{SR}$  with 1:

$$P\{\bar{S} \wedge L \wedge A_{j-i} \wedge \bar{D}\} = \sum_{k=1}^i \binom{i}{k} (1 - p_S) (1 - p_R)^{i-k} p_R^k p_{RR}^{k(N-j)} p_{RD}^k \cdot \binom{N-i}{j-i} \left( \sum_{m=1}^k \binom{k}{m} p_{RR}^{k-m} (1 - p_{RR})^m \right)^{j-i} \quad (\text{A.4})$$

Considering the probability of the transition  $i \rightarrow i$ , where  $N + 1 > i > 0$ , it can be checked that it is given by:

$$p_{i,i} = (P\{\bar{S}\} + P\{S \wedge A_0 \wedge \bar{D}\}) \cdot (P\{\bar{L}\} + P\{L \wedge A_0 \wedge \bar{D}\}) \quad (\text{A.5})$$

The terms in (A.5) are computed from the probabilities of the system in the following way:  $P\{\bar{S}\} = 1 - p_S$ ,  $P\{\bar{L}\} = (1 - p_R)^i$ ,  $P\{S \wedge A_0 \wedge \bar{D}\} = p_S p_{SR}^{N-i} p_{SD}$ , and

$$P\{L \wedge A_0 \wedge \bar{D}\} = \sum_{k=1}^i \binom{i}{k} (1 - p_R)^{i-k} p_R^k p_{RR}^{k(N-i)} p_{RD}^k.$$

The transition probability  $p_{i,N+1}$ , with  $0 < i < N + 1$  is expressed as:

$$p_{i,N+1} = P\{S \wedge D\} + (P\{\bar{S}\} + P\{S \wedge \bar{D}\}) P\{L \wedge D\}$$

where the computation of  $P\{S \wedge D\}$ ,  $P\{\bar{S}\}$  and  $P\{S \wedge \bar{D}\}$  is straightforward, and the last term is given by:

$$P\{L \wedge D\} = \sum_{k=1}^i \binom{i}{k} (1 - p_R)^{i-k} p_R^k \cdot \sum_{m=1}^k \binom{k}{m} p_{RD}^{k-m} (1 - p_{RD})^m. \quad (\text{A.6})$$



The transition probabilities from state 0 are obtained with the following expressions:

$$\begin{aligned} p_{0,0} &= p_S p_{SD} p_{SR}^N + (1 - p_S) \\ p_{0,N+1} &= p_S (1 - p_{SD}) \\ p_{0,j} &= \binom{N}{j} p_S (1 - p_{SR})^j p_{SR}^{N-j} p_{SD} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

where  $j < N + 1$ . Finally, transition probabilities from state  $N + 1$  are:  $p_{N+1,0} = p_{SR}^N p_{SD}$ ,  $p_{N+1,N+1} = 1 - p_{SD}$  and, when the next state is  $j$ , such that  $0 < j < N + 1$ , the transition probability is:

$$p_{N+1,j} = \binom{N}{j} (1 - p_{SR})^j p_{SR}^{N-j} p_{SD}. \quad (\text{A.8})$$

Keeping in mind that  $p_{i,j} = 0$  if  $N + 1 > i > j$  (see Fig. A.2), we obtain the following DTMC transition matrix:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,N} & p_{0,N+1} \\ 0 & p_{1,1} & \cdots & p_{1,N} & p_{1,N+1} \\ 0 & 0 & \cdots & p_{2,N} & p_{2,N+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{N,N} & p_{N,N+1} \\ p_{N+1,0} & p_{N+1,1} & \cdots & p_{N+1,N} & p_{N+1,N+1} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

## Performance Analysis

Let  $\bar{\pi} = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{N+1}\}$  be the steady-state distribution of the DTMC, where  $\pi_i$  is the steady-state probability of state  $i \in \Omega$ .  $\bar{\pi}$  is obtained by solving the following system of linear equations:

$$\begin{aligned} \bar{\pi} &= \bar{\pi} \mathbf{P} \\ \sum_{i \in \Omega} \pi_i &= 1 \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

where  $\mathbf{P}$  is given by (A.9). Solving (A.10) for  $\bar{\pi}$  we obtain the following solution:

$$\pi_i = \alpha_i \pi_{N+1} \quad (\text{A.11})$$

where, obviously  $\alpha_{N+1} = 1$ . The value of  $\alpha_i$  is given by the following recursive equation:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 - p_{i,i}} \left( p_{N+1,i} + \sum_{k=0}^{i-1} p_{k,i} \alpha_k \right) \quad (\text{A.12})$$

and  $\pi_{N+1}$ , by the normalization condition, is given by:

$$\pi_{N+1} = \left( \sum_{i=0}^{N+1} \alpha_i \right)^{-1}. \quad (\text{A.13})$$

The throughput is defined as the average number of frames successfully received in the destination node per time-slot. According to the model, the throughput is the average number of time-slots that the DTMC spends in state  $N + 1$ .

The retransmission rate is defined as the number of retransmissions from the source, normalized by the total number of time-slots. This measurement reflects the amount of resources allocated to retransmissions. In order to compute the retransmission rate, a reward model is constructed. This approach has been previously applied to the analysis of ARQ protocols. See [41] for a description of this technique.

Considering a generic transition  $i \rightarrow j$ , let  $R_{ij}$  denote the average number of retransmissions from S associated to this transition (associated reward). Analytically it is expressed as  $R_{ij} = P\{S|i \rightarrow j\}$ . The retransmission rate associated to a reference state,  $i$ , is computed with the following expression:

$$R_i = \sum_{j \in \Omega} p_{ij} R_{ij}. \quad (\text{A.14})$$

Applying the law of total probability, the resulting rates are  $R_i = p_S$  for  $i < N + 1$ , and  $R_{N+1} = 0$ , because the transitions  $N + 1 \rightarrow j$  for  $j \in \Omega$  always involve the transmission of a new frame, which obviously can not be considered as a retransmission. The average retransmission rate ( $R$ ) at the sender is given by a weighted sum of the rates in (A.14), where the weighting factors are the steady state probabilities of the Markov chain:

$$R = \sum_{i \in \Omega} \pi_i R_i. \quad (\text{A.15})$$

Because we focus on finding the optimal  $p_S$ , we use, for convenience, the following notation: The steady state distribution of the system is denoted by  $\bar{\pi}(p_S)$ . Then, the throughput is given by  $T(p_S) = \pi_{N+1}(p_S)$ . It is obvious that, for any given set of values  $\{p_{SD}, p_{SR}, p_{RD}, p_N\}$ , the maximum throughput is achieved when the source retransmits in every time-slot until an ACK reception ( $p_S = 1$ ). Thus, we define the maximum throughput as  $T_M = T(1)$ .  $T_M$  is taken as a reference to evaluate different values of  $p_S$ . Similarly, we can express  $R$  in terms of  $p_S$  as  $R(p_S) = p_S(1 - \pi_{N+1}(p_S))$ . Therefore, the retransmission rate associated with  $T_M$  is  $R_M = R(1)$ .

## Balancing Throughput and Bandwidth Efficiency

There exists a clear tradeoff between the two performance measurements derived in previous section. The maximum throughput,  $T_M$ , is achieved by setting  $p_S = 1$ . However, this can lead to a high retransmission rate, especially if the direct link is highly degraded. On the other hand, if  $p_S = 0$ , then the retransmission rate reduces to 0. In order to find an optimum balance of both objectives, we use an approach based on a multi-objective optimization technique, known as global criterion method [42]. This method consists of minimizing a global criterion function, defined as:

$$G(p_S) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \left( \frac{O_k - f_k(p_S)}{O_k} \right)^2 \quad (\text{A.16})$$

where  $n$  is the number of objective functions,  $f_k(p_S)$  are the objective functions,  $O_k$  are the optimum values for each objective function and  $\alpha_k$  are the factors weighting the relative

importance assigned to each objective. In the system analyzed, we are balancing two objectives. First, it is desirable that the throughput approaches the maximum throughput as much as possible, i.e.  $f_1(p_s) = T(p_s)$  and  $O_1 = T_M$ . Second, it is also desirable to reduce the retransmission rate of S, therefore  $f_2(p_s) = R(p_s) + C$ , and  $O_2 = C$ , where  $C$  is an auxiliary non-zero real number required to avoid a division by 0 in the global objective. In our model we choose  $C = 1$  because the relative importance of  $R(p_s)$  approaching to 0 is already controlled by  $\alpha_2$ . Applying these definitions in (A.16) we obtain:

$$G(p_s) = \alpha_1 \left( \frac{T_M - T(p_s)}{T_M} \right)^2 + \alpha_2 R(p_s)^2. \quad (\text{A.17})$$

Let  $p_s^*$  denote the solution to the multi-objective optimization problem. Because  $p_s^*$  is a probability, we must consider the constraint  $0 \leq p_s \leq 1$ . Therefore we have:

$$p_s^* = \arg \min_{0 \leq p_s \leq 1} \{G(p_s)\}. \quad (\text{A.18})$$

Let  $T_O = T(p_s^*)$  be the optimum throughput in terms of the multi-objective optimization problem. Similarly, let  $R_O = R(p_s^*)$  denote the optimum retransmission rate. In the following section we compare  $T_O$  and  $R_O$  with  $T_M$  and  $R_M$  in several scenarios. Because our objective is to improve the bandwidth efficiency with the less possible impact on the throughput, the weighting factors chosen are  $\alpha_1 = 1$  and  $\alpha_2 = 0,2$ . The following section shows that this configuration is adequate in the two scenarios under study and discusses the effects of modifying these factors.

## Numerical Results

The numerical results in this section show the impact of the environmental parameters on the global performance of the system. We consider two scenarios. The first one represents a relay enhanced cell, where the relays are part of the network infrastructure. In the second one, the relays are cooperative users. In both scenarios, we compare the performance of the deterministic C-ARQ configuration ( $p_s = 1$ ) with the optimized one ( $p_s = p_s^*$ ).

### Infrastructure Relays

Because in this scenario relays are part of the network infrastructure, it is realistic to assume that they have been deployed to have a relatively good *relay link* ( $p_{SR} = 0,2$ ). Another realistic assumption is that these relays always cooperate in the retransmission process ( $p_R = 1,0$ ) and that the user whose communication is assisted by the relay cooperation group has a degraded *direct link* ( $p_{SD} = 0,5$ ) and a good *access link* ( $p_{RD} = 0,1$ ). Otherwise, C-ARQ might not be especially helpful. It is also assumed that the links among the relays of a cooperation group have good propagation conditions ( $p_{RR} = 0,1$ ).

Fig. A.3 shows the performance metrics using the deterministic policy ( $T_M$  and  $R_M$ ), and using the optimized policy ( $T_O$  and  $R_O$ ) versus the number of relays. As expected, as the number of relays increases, the optimized algorithm assigns a smaller retransmission

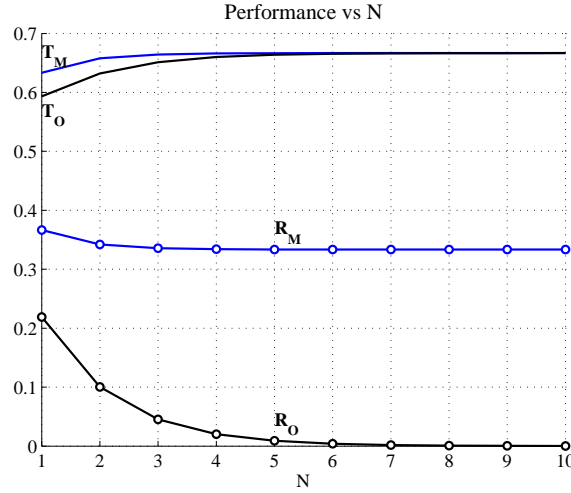


Figura A.3: Performance vs. N in a relay enhanced cell scenario.

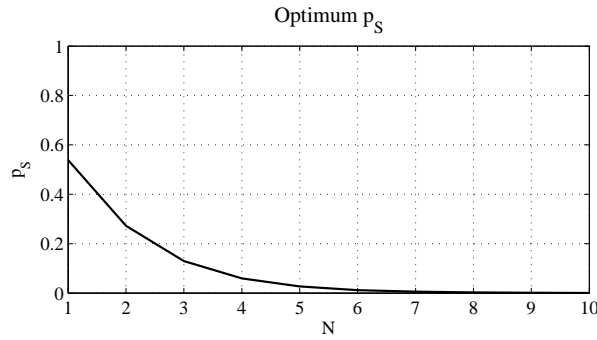


Figura A.4:  $p_S^*$  vs. N in a relay enhanced cell scenario.

probability to the sender (see Fig. A.4). It is remarkable that this strategy has an almost negligible impact on the throughput, given that  $T_O$  remains very close to  $T_M$ . It can be seen in Fig. A.3 that, when N is larger than 6, the source retransmits with a probability very close to 0, which means that the sender virtually delegates all the retransmission process to the relay cooperation group.

## Cooperative Users Acting as Relays

Because the relay cooperation group is formed by users that are close to each other, it is reasonable to assume that their distances to the base station are very similar. Thus, considering relatively degraded channel conditions in their links with the base station, we set  $p_{SD} = p_{SR} = 0,4$ . In contrast, the distance among them should be small,  $p_{RD} = p_{RR} = 0,05$ . Users are not necessarily devoted to cooperation, therefore we consider a much lower willingness to cooperate than in previous scenario ( $p_R = 0,2$ ). Fig. A.5 shows the performance figures versus the number of cooperative users. The value of  $p_S^*$  for the optimized strategy is shown in Fig. A.6.

The optimum strategy is also useful to reduce the retransmission rate at the base sta-

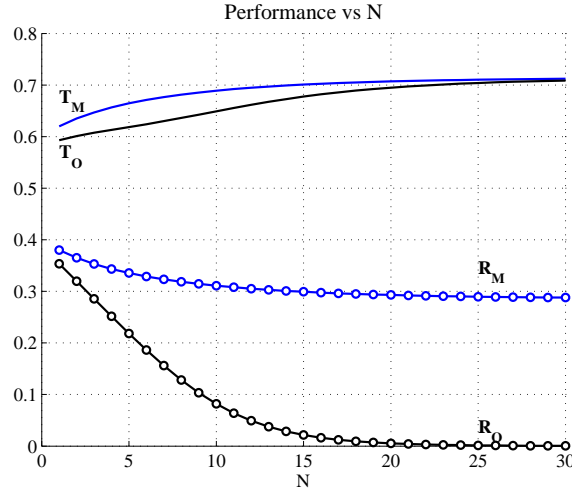


Figure A.5: Performance vs.  $N$  when the relays are cooperative users.

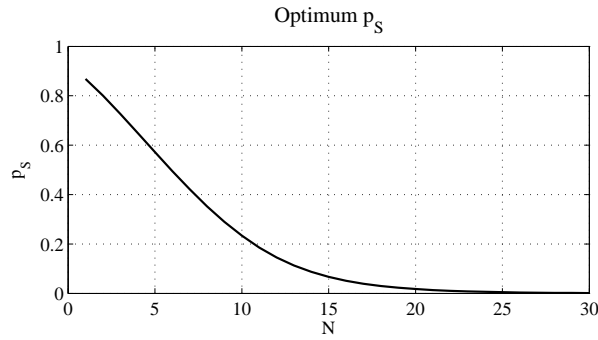


Figure A.6:  $p_S^*$  vs.  $N$  when the relays are cooperative users.

tion. However, in contrast to previous scenario, more relay nodes are required to obtain the maximum throughput with the optimized strategy. As the number of cooperative users increases,  $T_O$  gets closer to  $T_M$  and  $p_S$  decays (see Fig. A.6), which obviously reduces  $R_O$  even more. It was checked that, as the value of the weighting factor  $\alpha_2$  in (A.17) is reduced,  $T_O$  gets closer to  $T_M$  in all values of  $N$ . At the same time,  $R_O$  also increases, which reveals that, in this scenario, retransmissions from  $S$  have more impact on the throughput.

## Conclusions

This paper analyzes the performance of a C-ARQ protocol comprising a cooperation group of relays. The system is modeled by means of a Markov-reward model for the computation of the throughput and the retransmission rate. There exists a clear tradeoff between these two metrics. We propose a multi-objective optimization strategy to compute a retransmission probability at the source that balances these two objectives. The system is evaluated in two different scenarios. The first one corresponds to a situations where relays are part of the network infrastructure (relay enhanced cell), and therefore relays are

fully devoted to cooperation. The second one corresponds to situations where other users act as relays, forming cooperation groups when certain conditions hold, e.g., when they are close to each other (good relay link) and far from the base station (degraded direct and relay links). Users are considered to cooperate with a small probability. In both scenarios it was observed that the proposed strategy is able to reduce the retransmission rate at the base station with a small reduction of the throughput in the single-destination case. In a multiple-destination scenario, the retransmission rate reduction at the base station allows it to allocate more transmission opportunities to new frames, increasing the overall throughput.

The proposed strategy breaks with the classical and widely adopted policy of giving maximum priority to retransmissions in wireless access nodes. This idea can be applied to the design of scheduling mechanisms, considering the computed retransmission probability  $p_S^*$  as a lower bound for the amount of bandwidth reserved for retransmissions. The rest of the bandwidth can be assigned to other communication processes whenever they have available data.

Because the optimization algorithm runs in the sender node, S must be informed of the (average) propagation conditions of each channel, which is very usual in mobile networks. Moreover, it is especially important for the base station to know both the number of relays in the cooperation group and their willingness to cooperate. These two factors have shown a great influence in the value of  $p_S^*$  and in the overall performance of the system.

The research activity in relay-based broadband wireless networks is currently very active and in consequence many issues are still open. The ideas developed in this paper open new research lines that require further investigation to consolidate and generalize these initial findings. For example, what is the impact of frame discarding at the relay nodes (Truncated C-ARQ)? Is the protocol also suitable in radio interfaces where collisions can occur? Some related contributions in these scenarios can be found in [43] and [40].

## Acknowledgment

This research has been supported by project grant TEC2007-67966-01/TCM (CONPARTE-1) and it was also developed in the framework of “Programa de Ayudas a Grupos de Excelencia de la Región de Murcia, Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la RM (Plan Regional de Ciencia y Tecnología 2007/2010”.

## Authors

Juan J. Alcaraz and Joan García-Haro. {juan.alcaraz@upct.es, joang.haro@upct.es}

Department of Information Technologies and Communications, Technical University of Cartagena. Plaza Hospital, 1, 30202. Cartagena, Spain

# Acrónimos y abreviaturas

**NLOS** *Non Line Of Sight -Sin línea de visión directa-*

**P2P** *Peer to Peer*

**RN** *Relay Nodes*

**VoIP** *Voice over IP*

**ARQ** *Automatic Repeat-reQuest*

**C-ARQ** *Cooperative-ARQ*

**SH ARQ** *Single Hope ARQ*

**ACK** *ACKnowledgement*

**NACK** *Negative ACKnowledgement*

**SN** *Sequence Number*

**FES** *Future Event Set*

**RTT** *Round Trip Time*

**BER** *Bit Error Rate*

**PER** *Packet Error Rate*

**CQI** *Channel Quality Indicator*

**MAN** *Metropolitan Area Network*

**LAN** *Local Area Network*

**MMR** *Mobile Multihop Relay*

**MIMO** *Multiple-Inputs Multiple-Outputs*

**OFDM** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*





# Bibliografía

- [1] Academic Public License  
*<http://www.omnetpp.org/home/license>*
- [2] Redes e Internet de Alta Velocidad. Rendimiento y Calidad de Servicio,  
*William Stallings*,  
2º Edición, Prentice Hall, 2002.
- [3] Computer Networks,  
*Andrew Tanembaun*,  
4º Edición, Pearson Education, 2003.
- [4] Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.  
*IEEE std. 802.16, 2004.*
- [5] Performance of Single-Relay Cooperative ARQ Retransmission Strategies,  
*Juan J. Alcaraz, Joan García Haro*,  
IEEE Communication Letters, ISSN: 1089-7798, Vol.13, pp.:121 - 123. Feb. 2009.
- [6] Performance Evaluation of Multiple-Relay Cooperative ARQ Strategies for Mobile Networks,  
*Juan J. Alcaraz, Joan García Haro*,  
IEEE International Conference on Communications (ICC'09), Dresden, Germany, 2009.
- [7] Cooperative MAC Protocols for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks.  
*Niraj Agarwal*,  
Master's Thesis, The University of Texas at Dallas, 2006
- [8] Space-Time Processing for Cooperative Relay Networks.  
*Ingmar Hammerstroem, Marc Kuhn, Boris Rankov and Armin Wittneben*,  
Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Communication Technology Laboratory, Switzerland
- [9] "User cooperation diversity-Part I: System description" y "User cooperation diversity-Part II: Implementation aspects and performance analysis".

- A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang,*  
IEEE Transactions on Communications, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1948, Nov. 2003.
- [10] Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient protocols and outage behavior.  
*J. N. Laneman, D. N. C. Tse, G. W. Wornell,*  
IEEE Trans. Info. Theory, vol. 50, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [11] Cooperation diversity through coding.  
*T. E. Hunter, A. Nosratinia,*  
Proc. IEEE ISIT'2002, Laussane, Switzerland, 2002
- [12] Performance analysis of coded cooperation diversity.  
*T. E. Hunter, A. Nosratinia,*  
Proc. IEEE ICC'2003, Anchorage, Alaska, vol. 4, May 2003.
- [13] Coded cooperation in wireless communications: Space-time transmission and iterative decoding.  
*M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, A. Nosratinia,*  
IEEE Trans. Signal Processing, vol. 52, pp.362–371, Feb. 2004.
- [14] Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks.  
*J. N. Laneman, G. W. Wornell,*  
IEEE Trans. Info. Theory, vol. 49, pp. 2415–2425, Oct. 2003.
- [15] Cooperative ARQ in Wireless Networks: Protocols Description and Performance Analysis.  
*Guanding Yu, Zhaoyang Zhang, Peiliang Qiu,*  
Proc. IEEE ICC 2006, Istanbul, Turkey, pp. 3608-3614
- [16] Cooperative ARQ Protocols in Slotted Radio Networks.  
*Isabella Cerutti, Andrea Fumagalli, Puja Gupta,*  
Erik Jonsson School of Engineering and Computer Science, The University of Texas at Dallas, 2005
- [17] Engineering Optimization: Theory and Practice.  
*S. Rao,*  
Third Edition, Wiley, 1996
- [18] Chsim: Wireless channel simulator for OMNeT++.  
*T. Pawlak, S. Valentin,*  
<http://www.cs.uni-paderborn.de/en/fachgebiete/research-group-computer-networks/projects/chsim.html>
- [19] ChSim – A wireless channel simulator for OMNeT++.  
*S. Valentin,*  
TKN TU Berlin Simulation workshop, September 2006

- [20] Implementing MAC Protocols for Cooperative Relaying: A Compiler-Assisted Approach *H. S. Lichte and S. Valentin*,  
Proc. Int. Conf. on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools), Mar. 2008
- [21] Simulating Wireless and Mobile Networks in OMNeT++: The MiXiM Vision  
*A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, P.T. K. Haneveld, T. Parker, O. Visser, H. S. Lichte, and S. Valentin*,  
Proc. Int. Workshop on OMNeT++ collocated with SIMUTools, Mar. 2008.
- [22] P2P Telephony Explained — For Geeks Only.  
<http://www.skype.com/help/guides/p2pexplained/>
- [23] RFC 3366: Advice to link designers on link Automatic Repeat reQuest (ARQ).  
*G. Fairhurst, L. Wood*,  
IETF, August 2002
- [24] MiXiM project  
<http://mixim.sourceforge.net/>
- [25] Towards 4G technologies: services with initiative  
*Hendrick Berndt*,  
ISBN 978-0-470-01031, Ed. John Wiley and Sons, 2008
- [26] Wireless Mesh and Relay Networks  
*Pavel Mach, Robert Bešt'ák*,  
Czech Technical University in Prague,
- [27] Packet management scheme for location-independent end-to-end delay in IEEE 802.11 s multi-hop wireless mesh networks  
*Y.H. Bae, K.J. Kim, E. Hwang, J.S. Park, B.D. Choi*,  
Telecommunications, 2008. ICT 2008
- [28] Future WiMAX relay stations have you hop until you drop  
<http://www.wimax.com/commentary/blog/blog-2008/future-wimax-relay-stations-have-you-hop-until-you-drop>
- [29] Cognitive wireless networks: concepts, methodologies and visions inspiring the age of enlightenment of wireless communications  
*Frank H. P. Fitzek, M. D. Katz*,  
Ed. Springer, 2007
- [30] Trends in Broadband Cellular Communication  
*Robert W. Heath Jr.*  
<http://users.ece.utexas.edu/~rheath/research/mimo/4G/>
- [31] Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA  
*Stefan Parkvall, Eva Englund, Magnus Lundevall, y Johan Torsner*,  
IEEE Communications Magazine, vol. 44, 2006

- [32] A. N̄osratinia, T. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, pp. 74–80, Oct. 2004.
- [33] D. Soldani and S. Dixit, "Wireless relays for broadband access [radio communications series]," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 3, pp. 58–66, March 2008.
- [34] F. Fitzek and M. Katz, *Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications*. Springer, 2006.
- [35] M. Dianati, X. Ling, K. N̄aik, , and X. Shen, "A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, pp. 1032–1044, May 2006.
- [36] I. Cerutti, A. Fumagalli, and G. Ho, "Saturation throughput gain in fixed multiplexing radio networks with cooperative retransmission protocols," *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, vol. 10, pp. 4489–4494, June 2006.
- [37] I. Cerutti, A. Fumagalli, and P. Gupta, "Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in slotted radio networks with poisson frame arrivals," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 2, pp. 371–382, Apr. 2008.
- [38] K. Doppler, A. Osseiran, M. Wodczak, and P. Rost, "On the integration of cooperative relaying into the winner system concept," *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pp. 1–5, 1-5 July 2007.
- [39] A. T. H. Holma, *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*. Wiley, 2006.
- [40] L. Xiong, L. Libman, and G. Mao, "Optimal strategies for cooperative mac-layer retransmission in wireless networks," *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, pp. 1495–1500, March 31 2008-April 3 2008.
- [41] M. Zorzi and R. Rao, "On the use of renewal theory in the analysis of ARQ protocols," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 1077–1081, Sep. 1996.
- [42] S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice. Third Edition*. Wiley, 1996.
- [43] I. Krikidis, "Distributed truncated ARQ protocol for cooperative diversity networks," *Communications, IET*, vol. 1, no. 6, pp. 1212–1217, Dec. 2007.